numero 63
novembre 1973
anno VI
volume XI

LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

La fisica degli ottoni

Una tromba suona quando nello strumento le vibrazioni delle labbra del suonatore interagiscono con le onde stazionarie. Queste si generano quando l'energia acustica viene rimandata indietro dalla campana dello strumento

di Arthur H. Benade

È facile comprendere perché gli strumenti a corda percossa o pizzicata producono il loro suono. Quando le corde vengono colpite o pizzicate esse vibrano a diverse frequenze naturali secondo la loro tensione e il loro diametro, la loro lunghezza e il materiale di cui sono fatte. L'energia della vibrazione si trasferisce poi all'aria attraverso una tavola vibrante di legno e una camera d'aria e il suono gradualmente si estingue. Il suonatore può variare l'altezza del suono, cioè la frequenza di vibrazione delle singole corde, cambiando la loro lunghezza vibrante mediante la pressione delle dita sui tasti o sulle corde.

Molto meno evidenti sono i principi su cui si basa l'acustica degli strumenti a corde sfregate, cioè ad arco, come il violino, o degli strumenti a fiato, come l'oboe. In questi la vibrazione è mantenuta per mezzo di un meccanismo di retroazione che converte un movimento costante dell'arco, o una pressione costante dell'aria soffiata, in una oscillazione acustica prolungata che si avverte come suono. Nel violino e nell'oboe si producono suoni diversi alterando la lunghezza effettiva delle corde o della colonna d'aria.

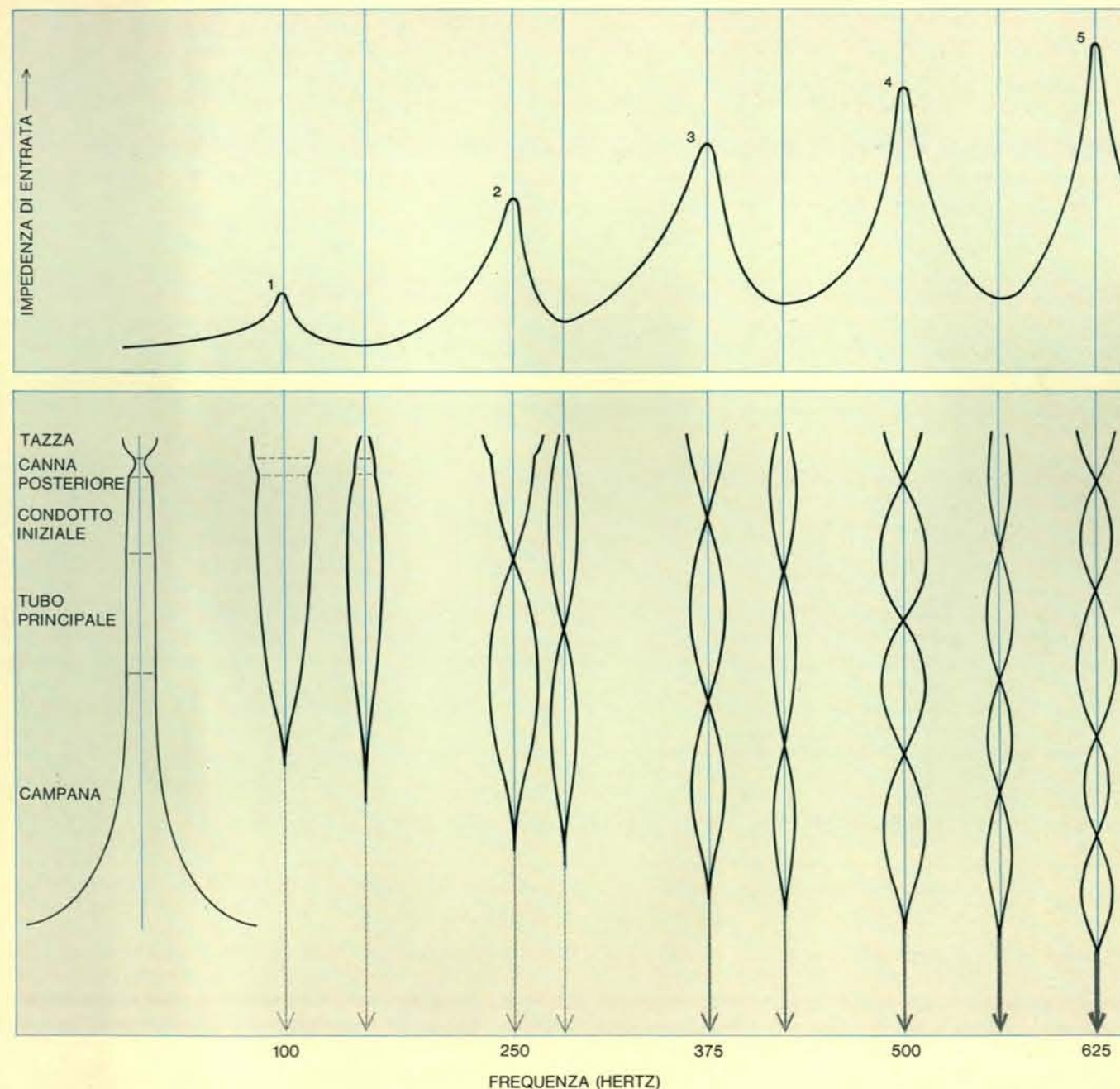
Come l'oboe e gli altri strumenti a fiato, anche gli ottoni possono produrre suoni prolungati. Sorge il problema, comunque, di come un flicorno, che non è altro che un anello di tubo conico di ottone con una imboccatura a un estremo e una campana svasata all'altro, riesca a produrre una dozzina o piú di suoni distinti. Si sono costruiti e suonati corni per secoli prima che i fisici fossero capaci di trovare delle buone spiegazioni sul loro funzionamento, benché questi problemi fossero stati oggetto di ricerca fin dall'antichità. Abili artigiani sono stati capaci, per secoli, di trovare cosa non andasse negli strumenti difettosi e di porvi rimedio senza ricorrere a raffinate conoscenze di acustica.

Tutti gli strumenti di ottone consistono di un bocchino (che è composto di una coppa e da un tubo posteriore rastremato), di un raccordo che possiede anch'esso una rastrematura studiata con grande attenzione, di una canna principale (che può essere cilindrica o conica) e di una campana svasata che forma l'uscita dall'interno nello spazio attorno allo strumento. Gli ottoni sono principalmente di due tipi. Una famiglia, che comprende la tromba, il trombone e il corno da caccia, è caratterizzata da una considerevole lunghezza di tubo cilindrico che termina in una campana che si allarga bruscamente. L'altra famiglia – quella degli strumenti conici – comprende il flicorno soprano, il corno contralto, il corno baritono e la tuba. Il termine generico « conico » si riferisce al fatto che, generalmente, il tubo principale aumenta di diametro dall'imboccatura alla campana e l'apertura della campana è molto meno pronunciata che nella prima famiglia. In realtà anche tutti i corni conici incorporano una certa quantità di tubo cilindrico nella loro sezione centrale. Qui tratterò principalmente le proprietà degli strumenti della famiglia della tromba e del trombone, dato che le proprietà degli strumenti conici sono molto simili ma un po' piú semplici dal punto di vista acustico perché globalmente hanno una campana meno pronunciata.

Lo studio acustico delle onde in una colonna d'aria la cui sezione trasversale varia lungo la sua lunghezza (il corno) risale alla metà del XVIII secolo. Daniel Bernoulli, Leonardo Eulero e Joseph Louis Lagrange furono i primi a discutere l'equazione delle onde negli strumenti a fiato, nella decade dopo il 1760. La loro attività fa parte della rapida e grandissima fioritura della fisica teorica che ebbe luogo negli anni successivi all'enunciazione delle leggi del moto da parte di Newton e Leibnitz. Le ricerche teoriche sulla dinamica dei fluidi, sull'acustica, sul flusso termico e sulla meccanica dei solidi si ispirarono al mondo esterno al laboratorio e allo studio del matematico. Il lavoro di Bernoulli, Eulero e Lagrange sui corni (e le loro analoghe ricerche sugli strumenti a corda) non ebbero in fin dei conti una grande influenza sulla scienza dell'acustica o sull'arte della musica. Esso, tuttavia, fa parte della fioritura della teoria delle equazioni differenziali a derivate parziali che sono alla base di quasi tutta la fisica.

L'« equazione del corno », come si chiama oggi, fu trascurata fino al 1838 quando George Green la riscoprí mentre studiava l'erosione causata dalle onde nell'allora recente sistema di canali inglese.

Dopo di allora l'equazione fu di nuovo dimenticata fino al 1876 quando un matematico tedesco, L. Pochammer, la derivò – indipendentemente dagli altri – per le onde in una colonna d'aria e trovò le proprietà delle sue soluzioni piú importanti. Ma né Pochammer né la sua equazione furono ricordati a lungo. Infine, nel 1919, il fisico americano A. G. Webster pubblicò un articolo sull'equazione del corno, col risultato che l'equazione è adesso nota con il suo nome.

Dall'epoca di Webster l'interesse per gli altoparlanti da parte delle industrie di grammofoni e di radio, nonché le richieste militari per apparati acustici antisommergibili, hanno tenuto vivo l'argomento dell'acustica del corno. Un altoparlante deve essere in grado di emanare in maniera efficace nell'aria i suoni emessi da una piccola sorgente e su un largo spettro di frequenze. Uno strumento musicale della famiglia dei corni ha necessità completamente diverse; l'apertura della sua campana deve essere progettata in modo da intrappolare energia nello strumento cosí da fornire onde stazionarie fortemente delineate a frequenze ben definite.

I picchi di risonanza di uno strumento del tipo della tromba (*in alto*) possono essere rappresentati sotto forma di impedenza, misurata nel bocchino. L'impedenza si definisce come il rapporto tra la pressione che si stabilisce nel bocchino e il flusso d'aria che la provoca. Il valore dell'impedenza varia secondo che l'onda sonora riflessa dalla campana dello strumento ritorni in fase o fuori fase con l'onda di pressione oscillante che si produce nel bocchino. La forma della colonna d'aria nello strumento è illustrata a sinistra nel diagramma in basso. Le curve sulla destra sono le forme dell'onda stazionaria che si formano nella colonna d'aria dello strumento alle frequenze che producono i massimi e i minimi della curva di impedenza. Il primo massimo è a circa 100 hertz (cicli al secondo) quando l'onda riflessa è esattamente in fase con l'onda in entrata. Le piccole irregolarità nella forma dell'onda stazionaria sono prodotte dalle brusche variazioni della sezione trasversale dello strumento. Il primo minimo viene a circa 150 hertz, quando l'onda riflessa e quella in entrata sono esattamente l'una opposta all'altra nel bocchino dello strumento. In maniera simile si spiegano i successivi massimi e minimi che si presentano.

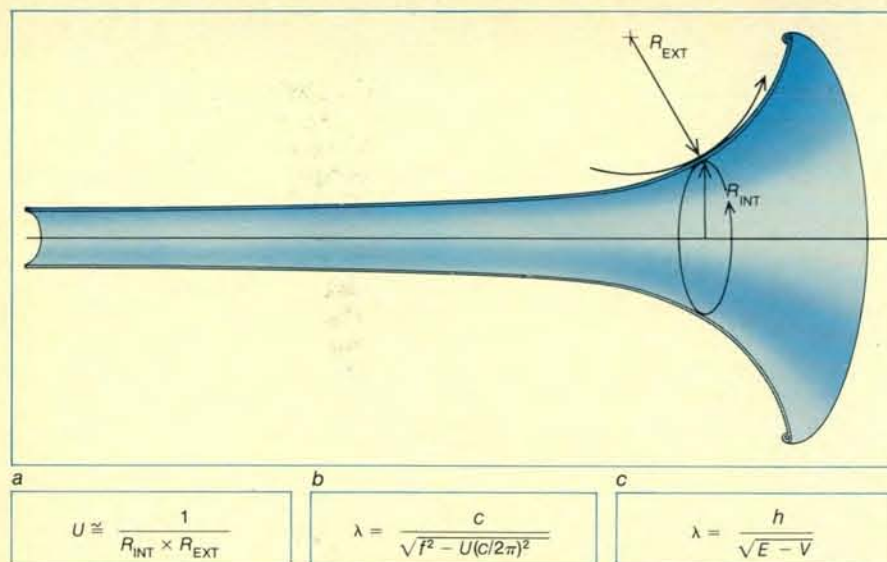
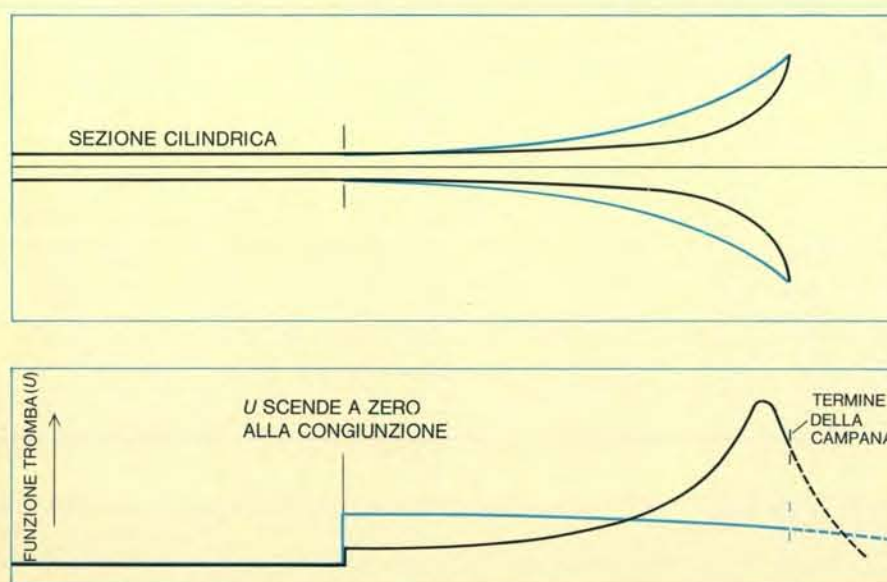
a

$$U \cong \frac{1}{R_{INT} \times R_{EXT}}$$

b

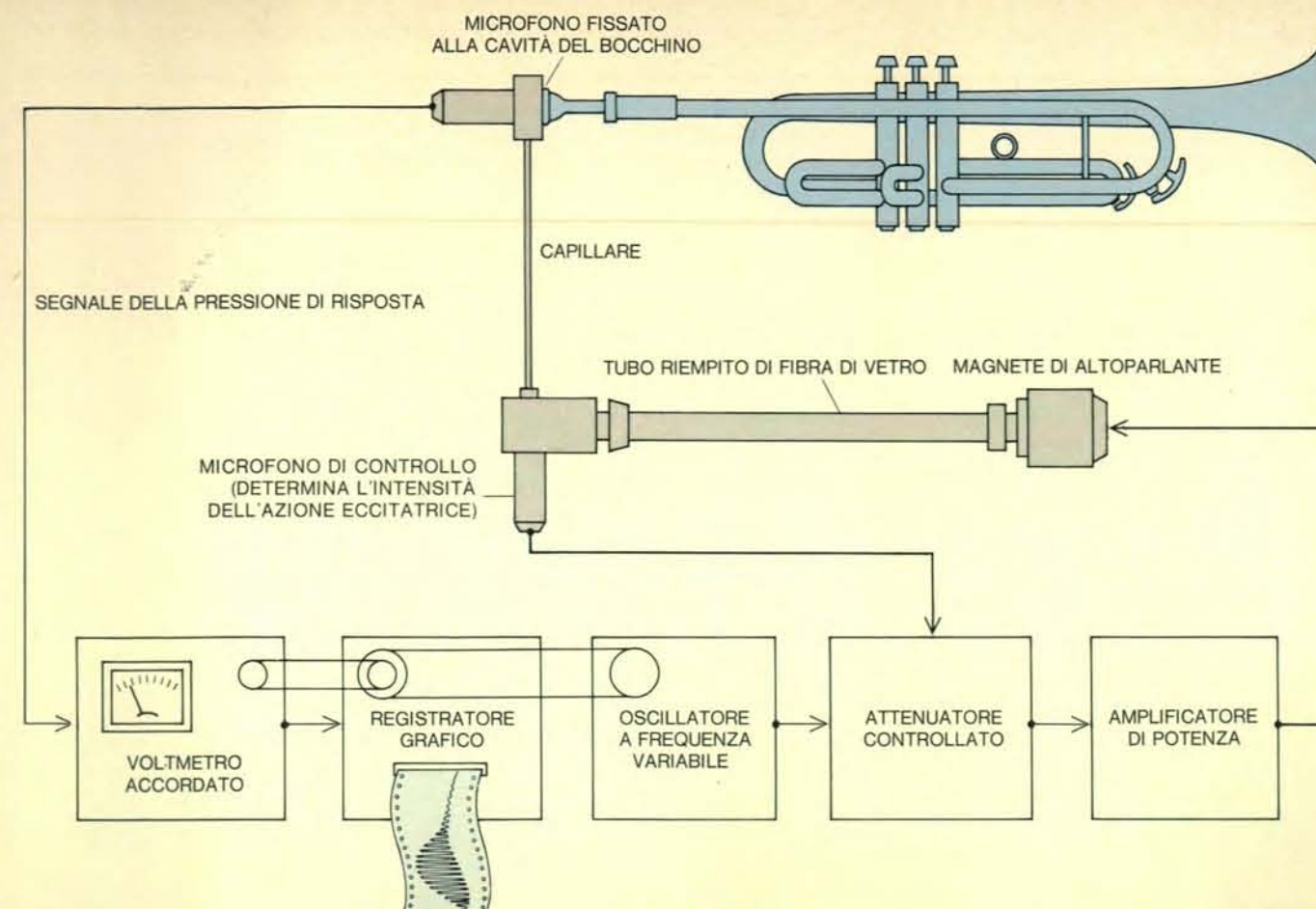
$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{f^2 - U(c/2\pi)^2}}$$

c

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{E - V}}$$

La geometria della campana dei corni governa l'altezza e il timbro dei suoni prodotti dagli strumenti della famiglia dei corni. Mentre l'onda sonora si muove nella campana svasata del corno la sua pressione diminuisce notevolmente all'aumentare della sezione trasversale dello strumento. Una « funzione corno », U, determina quanta energia acustica lascia lo strumento e quanta viene riflessa in modo da produrre onde stazionarie. La funzione corno (*equazione « a »*) è circa eguale all'inverso del prodotto del raggio interno (R_{int}) dello strumento e del raggio esterno (R_{ext}) in ogni punto. La forma semplificata dell'equazione del corno (*equazione « b »*) fornisce la lunghezza d'onda acustica (λ) in qualunque punto del corno. Con f è indicata la frequenza e con c la velocità del suono, la quale varia con U e f. L'equazione del corno ha la stessa forma della celebre equazione di Schroedinger (c), che mostra come la lunghezza d'onda di de Broglie (λ) di una particella di energia E è collegata alla costante di Planck (h) e al potenziale V in ogni punto dello spazio in cui la particella stessa può trovarsi.

La campana del trombone e l'altoparlante presentano sensibili differenze di geometria e proprietà acustiche. La forma catenoidale (generata dalla rotazione di una catenaria) dell'altoparlante è progettata per favorire l'efficiente emissione di energia nell'aria (*curva nera in alto*). La forma svasata della campana del trombone (*curva colorata in alto*) ha invece lo scopo di conservare l'energia all'interno, generando cosí onde stazionarie fortemente marcate a frequenza ben definita. Sia la campana del trombone che l'altoparlante sono attaccati a un breve tratto di tubo cilindrico. Le due curve in basso mostrano la funzione corno U per i due strumenti. Quella catenoidale ha una funzione che è bassa e quasi costante (*curva colorata*), eccezion fatta per un piccolo abbassamento all'estremità piú ampia, dove i fronti d'onda cominciano a gonfiarsi apprezzabilmente. La funzione corno della campana del trombone sale velocemente e quindi cade (*curva nera*). Piú alto è il valore della funzione U, piú alta è la barriera per i suoni di bassa frequenza. I suoni ad alta frequenza riescono ad andare piú avanti prima di essere riflessi dalla barriera. In entrambi i casi al di sopra di una certa frequenza gran parte dell'energia sonora si propaga al di là della barriera, cosí che la campana del trombone perde il carattere di strumento e si comporta da altoparlante.

È evidente che quando un'onda viaggia nella parte svasata della campana, la sua pressione diminuisce sistematicamente, per il semplice motivo che l'energia sonora si ripartisce su una superficie mano a mano piú grande. Se si estrae dall'equazione questa parte intuitivamente ovvia del comportamento di un'onda in un corno, si ottiene un'equazione molto piú semplice che è formalmente identica alla nota equazione di Schroedinger della meccanica quantistica. L'equazione di Schroedinger mostra che una particella di energia E è associata a una lunghezza d'onda di de Broglie (λ) che dipende dalla radice quadrata della differenza tra l'energia e il potenziale V in qualunque punto dello spazio. La forma ridotta o semplificata dell'equazione del corno mostra – analogamente – che in qualunque punto del tubo la lunghezza d'onda acustica dipende dalla radice quadrata della differenza tra il quadrato della frequenza e una « funzione corno » U che a sua volta dipende in maniera piuttosto semplice dalla natura dell'apertura dello strumento (*si veda la figura in alto in questa pagina*).

Non è difficile far vedere – partendo dall'equazione – che i suoni si propagano a velocità diverse muovendosi in zone caratterizzate da un diverso valore della funzione U. Un'altra rassomiglianza tra l'acustica dei corni e la meccanica quantistica è che per le frequenze al di sotto di un certo determinato valore della funzione U, la lunghezza d'onda diventa matematicamente immaginaria, o, per dirla in termini fisici, l'onda cambia aspetto e diventa fortemente smorzata. In altre parole, le regioni dove la funzione U è grande possono formare una barriera alla trasmissione delle onde e possono quindi ridurre il passaggio di energia dall'interno del corno all'esterno. La mancanza del suono del corno attraverso la barriera della funzione è un analogo perfetto della fuga di onde (e quindi di particelle) della meccanica quantistica attraverso la barriera di potenziale nucleare nel decadimento radioattivo del nucleo atomico.

Osserviamo ora con piú attenzione la differenza tra uno strumento a fiato e un altoparlante. Un esempio semplice di corno musicale può essere costruito unendo la campana di un trombone a un pezzo di tubo cilindrico. A un tubo dello stesso tipo si può unire una tipica campana di altoparlante, sagomata secondo una catenoide. Anche se i coni sono scelti in modo da avere gli stessi raggi alle due estremità, si

L'apparecchio per misurare l'impedenza usa il magnete di un altoparlante per provocare un flusso d'aria che, attraverso un capillare, eccita lo strumento in esame. Un microfono di controllo manda i segnali a un attenuatore per garantire che lo stimolo acustico che entra nel capillare resti costante. La risposta dello strumento, e quindi la sua impedenza d'entrata, è rilevata da un secondo microfono che forma la chiusura della tazza del bocchino. Il segnale del microfono va a un voltmetro accoppiato all'oscillatore tramite una cinghia. Un registratore grafico accoppiato al voltmetro disegna le curve di risonanza.

trova che le loro funzioni U sono assai diverse (*si veda la figura in basso a fronte*). La campana catenoide dell'altoparlante ha una funzione corno che è circa costante da un estremo all'altro, mentre le proprietà acustiche della stessa funzione per lo strumento musicale variano da punto a punto.

Cinque anni fa Erik V. Jansson del laboratorio per la trasmissione della parola dell'Istituto Reale di Tecnologia di Stoccolma lavorò con me alla Case Western Reserve University a uno studio dettagliato delle colonne d'aria simili a quelle che si trovano nei corni musicali. In questa ricerca – teorica e sperimentale – abbiamo studiato campane del tipo di quelle che si trovano nelle trombe, nei tromboni e nei corni da caccia. Trovammo un certo numero di sottili relazioni tra gli esperimenti e i calcoli che a quell'epoca non avemmo tempo di chiarire. Soltanto poco tempo fa abbiamo avuto modo di preparare delle relazioni esaurienti sui nostri risultati. In quello che segue mi baserò molto sulle informazioni che ottenemmo durante le nostre ricerche e sui loro sviluppi successivi, nonché sulle precedenti osservazioni di molti che si sono occupati di acustica o della fabbricazione dei corni.

In uno strumento musicale di cui l'estremità piú piccola è collegata al suonatore attraverso le labbra che costituiscono una specie di valvola a controllo automatico per l'ammissione dell'aria dai polmoni allo strumento. L'apertura e la chiusura della valvola sono controllate principalmente dalle variazioni di pressione nel bocchino che agiscono sulle labbra insieme alla pressione costante dei polmoni. Quindi un primo obbiettivo è trovare le relazioni tra il flusso dell'aria nello strumento e la pressione acustica che si stabilisce all'estremità di entrata.

Cominciamo immaginando un esperimento di laboratorio nel quale lo strumento è eccitato non dall'aria proveniente dalle labbra e dai polmoni del suonatore, bensí da un piccolo flusso oscillante che viene pompato su e giú nel bocchino attraverso un capillare da una pompa ad alta velocità. Questo piccolo disturbo oscillante nel bocchino dà origine a un'onda di pressione che alla fine raggiunge la campana dello strumento. Mentre l'onda viaggia per l'intera lunghezza dello strumento, una parte dell'energia viene dissipata dall'attrito e dalla trasmissione di calore attraverso le pareti dello strumento. Nella parte svasata della campana una aliquota notevole dell'onda acustica viene riflessa verso il bocchino mentre il resto oltrepassa la barriera della funzione U e si irradia nello spazio circostante. L'onda riflessa che ritorna indietro lungo la canna dello strumento si combina con le onde successivamente introdotte e forma un'onda stazionaria.

Se il tempo che l'onda richiede per andare dal bocchino alla campana e viceversa è eguale a metà dell'intervallo dell'azione eccitante o a un suo multiplo dispari, può nascere un'onda stazionaria di notevole entità che può dar luogo a sensibili disturbi nel bocchino. A frequenze intermedie dell'azione eccitante, l'onda di ritorno tende ad annullare l'influenza dell'onda diretta. In altre parole, a seconda dell'esatta interazione tra l'onda iniettata e l'onda riflessa, il disturbo di pressione al bocchino può essere grande o piccolo. Allo

scopo di descrivere questi disturbi nel bocchino in condizioni di eccitazione costante in un apparato di laboratorio, i tecnici definiscono una quantità detta impedenza d'ingresso: essa è il rapporto tra l'ampiezza di pressione che si stabilisce nel bocchino e il flusso eccitante che la provoca (*si veda la figura a pag. 11*).

La forma dello strumento, determinando la penetrazione delle onde stazionarie nella campana, controlla le frequenze naturalmente associate coi vari massimi e minimi di impedenza. La forma controlla inoltre la quantità di energia dell' onda che sfugge dallo strumento verso lo spazio circostante. Inoltre, le irregolarità dell'onda stazionaria che nascono dalle discontinuità della sezione trasversale e dalla conicità lungo la colonna d'aria producono dei cambiamenti significativi nelle caratteristiche di risonanza e di propagazione della campana. L' interazione tra questi disturbi e la forma base della colonna d'aria può determinare uno strumento cattivo o uno buono.

Ci sono molti modi per misurare la impedenza di ingresso, o « risposta », di una colonna d'aria. Concettualmente il metodo piú semplice sarebbe il pompare aria dentro e fuori dal bocchino attraverso un capillare a una certa frequenza e misurare l'ampiezza delle fluttuazioni di pressione che ne risultano per mezzo di un microfono sonda. È comunque piú pratico usare come pompa la membrana di un altoparlante commerciale. Il moto della membrana è controllato elettronicamente da un microfono ausiliario che mantiene un flusso oscillatorio di intensità costante mentre la frequenza varia automaticamente in un intervallo appropriato. Tra il 1945 e il 1965 Earle L. Kent e i suoi collaboratori alla C. G. Conn Ltd., hanno portato questa tecnica a un alto grado di affidabilità. Nel nostro lavoro usiamo spesso una modifica della loro tecnica (*si veda la figura alla pagina precedente*).

A Cleveland usiamo altri due metodi che per certi scopi presentano particolari vantaggi. Il primo metodo, basato su di un apparecchio descritto nel 1968 dal cecoslovacco Josef Merhaut, può essere utilizzato, oltre che per i piccoli ottoni, anche per lo studio dei clarinetti e dei fagotti (*si veda la figura in basso*). Nell'apparecchio di Merhaut un sottile diaframma chiude l'estremità del bocchino e fa da pistone della pompa. Questo diaframma vibra acusticamente per mezzo di un tubo che lo collega a un altoparlante. Il movimento della membrana è sorvegliato, per ottenere un controllo automatico, dall'elettrodo di un microfono a condensatore montato direttamente dietro di esso. Il secondo metodo è basato su un apparecchio che fu usato da John W. Coltman, dei laboratori di ricerca della Westinghouse per studiare il comportamento acustico del flauto. Nell'apparecchio di Coltman la membrana eccitatrice è condotta direttamente dalla bobina di un altoparlante il cui movimento è controllato per mezzo di una seconda bobina ricevitrice che si muove in un campo magnetico ausiliario (*si veda la figura in questa pagina*).

Un altro tipo di misuratore di impedenza sviluppato da Josef Merhaut. Differisce dall'apparato illustrato nella pagina precedente soltanto nel mezzo usato per controllare il flusso in entrata nel bocchino. Qui lo stimolo acustico prodotto da un altoparlante muove una membrana alluminizzata di Mylar che a sua volta spinge l'aria nel bocchino. Il diaframma funziona anche da elettrodo di un microfono a condensatore, in modo da produrre un segnale proporzionale alla velocità della membrana e quindi al flusso oscillante di aria nella tazza del bocchino. Il segnale di velocità regola l'attenuatore per mantenere costante l'eccitazione a una certa frequenza. La risposta dello strumento è rilevata da un microfono dal lato del diaframma che dà nel bocchino. Un misuratore di fase mostra la relazione tra la fase dello stimolo e la fase della risposta dello strumento.

Se si connette una sezione cilindrica di una tromba, di circa 140 centimetri, a uno di questi sistemi eccitatori, si scoprono dozzine di picchi di risonanze d'ingresso intervallate a multipli dispari di circa 63 hertz (*si veda la figura in alto a pagina 16*). I picchi corrispondono esattamente a quello che i testi elementari di fisica chiamano « frequenze naturali di un tubo cilindrico chiuso a una estremità ». Poiché le perdite termiche e per un attrito all'interno del tubo aumentano con la frequenza, i picchi di risonanza diventano piú piccoli alle alte frequenze. L'energia irraggiata dall'estremo aperto di questo tubo è solo una piccola frazione dell'uno per cento delle perdite alle pareti.

Se ora si aggiunge allo stesso tubo cilindrico una campana come quella delle trombe, la curva di risposta dell'impedenza si altera in maniera sostanziale (*si veda la figura in basso nella pagina seguente*). Il primo picco è appena spostato dall'aggiunta della campana, ma le frequenze delle altre risonanze si abbassano gradualmente perché le onde introdotte penetrano sempre piú nella campana prima di essere riflesse. Inoltre i picchi a frequenze piú alte vanno notevolmente diminuendo d'altezza perché una frazione crescente dell'energia in ingresso passa attraverso la «barriera» della campana all'aumentare della frequenza. Quindi l'onda di ritorno nel sistema tubo più campana è indebolita non solo dalle perdite alle pareti ma anche dalle perdite per emissione di energia sonora, in particolare alle alte frequenze. Per frequenze superiori a circa 1500 hertz non c'è praticamente piú energia che ritorni dalla parte allargata della campana. Le piccole oscillazioni nella curva dell'impedenza alle alte frequenze sono dovute principalmente a piccole riflessioni prodotte alla discontinuità dove la campana si congiunge al tubo cilindrico.

Paragonando queste curve di strumenti incompleti con la curva di impedenza di una cornetta completa (*si veda la figura a pagina 17*) si può vedere immediatamente che la presenza di un bocchino e di un tubo conico iniziale ha un notevole effetto sull'impedenza di ingresso.

I picchi di risonanza della cornetta vanno crescendo fino a circa 800 hertz, quindi decrescono piú bruscamente della curva prodotta dal sistema tubo-campana.

Consideriamo ora il modo in cui le labbra del suonatore controllano il flusso d'aria dai polmoni allo strumento. Mano a mano che il suonatore soffia piú forte, il flusso cresce sia per l'aumento di pressione attraverso l'apertura formata dalle sue labbra, sia perché le labbra vengono divaricate ulteriormente dall'aumento di pressione all'interno della bocca. Egualmente importante è la variazione imposta al flusso delle oscillazioni di pressione all'interno del bocchino, che tendono a fare aumentare o diminuire il flusso per mezzo della loro capacità di influire sull'apertura delle labbra. È questo controllo del flusso effettuato per mezzo della pressione delle labbra, sotto l'influsso della pressione del bocchino, che in ultimo porta alla formazione di oscillazioni permanenti. Estraiamo ora da questa situazione piuttosto complicata soltanto la sua parte piú importante, cioè la variazione del flusso che si produce per mezzo delle variazioni della pressione acustica nella cavità del bocchino. Fin dalla metà del XIX secolo si capí chiaramente che è l'alterazione del flusso dovuto alla pressione del bocchino che riesce a mantenere un'oscillazione.

Nel 1830 Wilhelm Weber descrisse degli esperimenti sull'azione delle ance dell'organo che lo portarono a formulare una teoria corretta sull'effetto di una struttura cedevole (l'ancia o, nel nostro caso, le labbra del suonatore) sull'impedenza di ingresso di una colonna d'aria. Quest'effetto di chiusura flessibile del bocchino provocato dalle labbra è una cosa completamente separata dal loro funzionamento come valvola. Hermann von Helmholtz fece il passo successivo. Nel 1877 egli aggiunse un'appendice alla quarta edizione tedesca del suo classico lavoro *La percezione del suono*, che fornisce una analisi breve ma completa del meccanismo mediante il quale una valvola ad ancia azionata dalla pressione interagisce con un singolo massimo di impedenza. Egli trovò che per una data sensibilità pressione-controllo (quella che i tecnici di oggi chiamano transconduttanza) è richiesto un determinato valore minimo di impedenza. Sistemi oscillanti del tipo analizzato da Helmholtz si trovano dappertutto. L'orologio a pendolo è forse il piú vecchio e familiare; anche gli orologi da polso, compresi quelli elettronici, ricadono in questa teoria e qualunque apparecchio radio o televisivo possiede uno o piú di questi oscillatori.

I tecnici hanno studiato a fondo i sistemi oscillanti e hanno imparato che, anche se l'alterazione del flusso (di qualunque tipo) provocata da una data pressione non è esattamente proporzionale alla pressione stessa (come Helmholtz per semplicità ipotizzò nelle sue ricerche pionieristiche) ma varia in modo piú arbitrario, le proprietà del sistema non si alterano in maniera sostanziale. La presenza di tale nonlinearità nelle caratteristiche del controllo dà luogo a frequenze addizionali doppie, triple e quadruple della frequenza dell'oscillazione di base. La produzione di energia oscillatoria per effetto dello sforzo muscolare del suonatore corrisponde comunque ancora quasi esclu-

Una sorgente elettromagnetica di onde acustiche per strumenti di prova realizzata da John W. Coltman. Il pistone eccitatore è direttamente accoppiato all'avvolgimento di un altoparlante. L'avvolgimento fa muovere a sua volta il pistone con un'ampiezza che è determinata, in ultimo, dalla tensione indotta in un avvolgimento « ricevente » che è montato coassialmente. Il meccanismo è adoperato in un sistema in un insieme che risulta molto simile a quello usato dal misuratore di impedenza di Merhaut.

IMPEDENZA DI ENTRATA

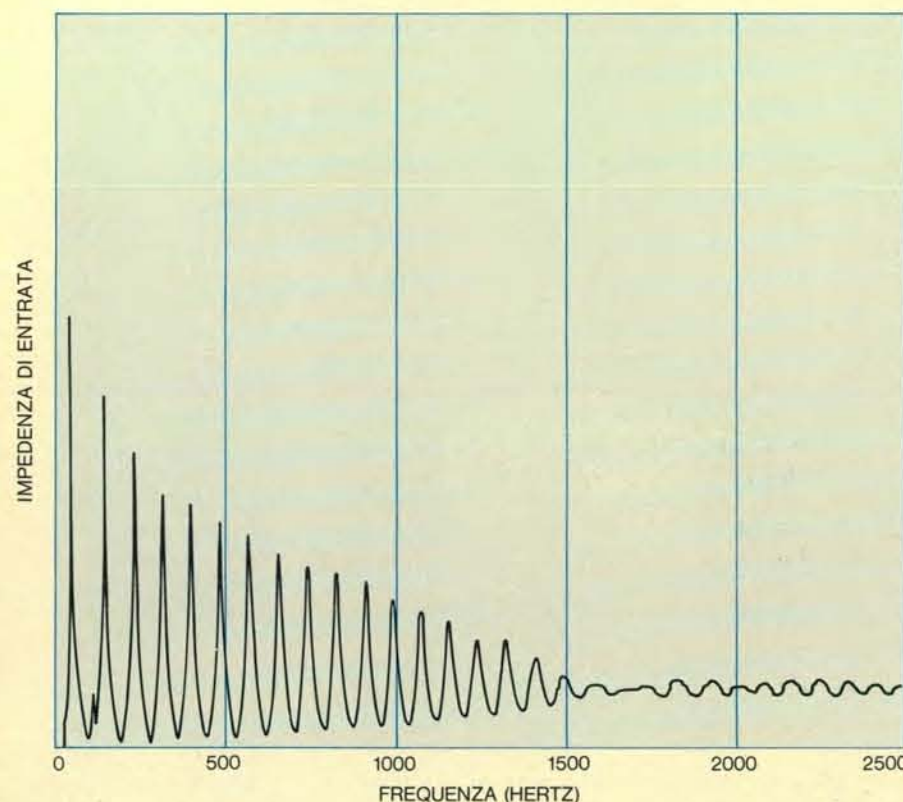
0 500 1000 1500 2000 2500

FREQUENZA (HERTZ)

Il diagramma dell'impedenza di un semplice tubo cilindrico lungo 140 centimetri mostra dei picchi regolarmente distanziati di 63 hertz. Piú alta è la frequenza, maggiore è la perdita di energia attraverso le pareti dovuta all'attrito ed è questo il motivo del rapido discendere dei picchi. Meno dell'un per cento dell'energia si irradia nella sala.

IMPEDENZA DI ENTRATA

0 500 1000 1500 2000 2500

FREQUENZA (HERTZ)

L'aggiunta di una campana di tromba al tubo abbassa l'altezza dei picchi di impedenza e li addensa. Mentre il tubo da solo produce 16 picchi in un intervallo di 2000 hertz, il sistema tubo piú campana comprime i primi 16 picchi in un intervallo di 1400 hertz. Al di là dei 1500 hertz una sempre maggior energia oltrepassa la barriera.

sivamente alla frequenza del massimo di impedenza; l'energia che nel corso del processo passa ad alte frequenze viene dissipata in vari modi nell'ambiente esterno.

Dobbiamo ora cercare di spiegare in che modo le oscillazioni in uno strumento a fiato possano aver luogo non solo al massimo assoluto di impedenza, ma anche a qualunque altro dei molti massimi che caratterizzano una colonna d'aria. Secondo la teoria di Helmholtz, uno strumento a fiato dovrebbe dimostrare una forte tendenza a oscillare secondo la frequenza che corrisponde al massimo assoluto dell'impedenza. Sorge cosí il problema di come il suonatore di flicorno riesca a suonare le note basate su massimi di impedenza secondari, e inoltre viene naturale chiedersi come faccia a scegliere l'uno o l'altro di questi picchi secondo le sue necessità musicali.

In effetti non è difficile risolvere il problema di come faccia il suonatore a scegliere la nota: le sue labbra hanno una massa talmente grande paragonata con quella dell'aria nello strumento che l'influenza della colonna d'aria sulle labbra è relativamente piccola. Il suonatore modifica la tensione delle sue labbra in modo tale che la loro naturale frequenza di oscillazione favorisca l'oscillazione della nota desiderata, cosí che la colonna d'aria e le labbra cooperano nel produrre la frequenza desiderata.

Finora non abbiamo detto niente che non potesse essere spiegato dall'acustica del XIX secolo. La migliore esposizione dell'analisi di Weber e Helmholtz e delle sue conseguenze musicali fu fatta da un fisico francese, Henry Bouasse, nel suo libro *Instruments à Vent*, i cui due volumi apparvero nel 1929 e 1930.

Questi volumi contengono quella che è tuttora una delle piú complete esposizioni dell'acustica degli strumenti a fiato, comprendente il flauto, le canne ad ancia dell'organo, i legni e gli ottoni. Bouasse ci ha lasciato una miniera d'oro di analisi matematica, nonché un'esposizione dell'attenta sperimentazione fatta in collaborazione con M. Fouché o tratta dagli scritti di precedenti ricercatori.

Bouasse si rendeva ben conto di quanto sia inadeguata una teoria dell'oscillazione che ipotizzi che tutta la produzione di energia avvenga alla frequenza base. Egli descrisse molti fenomeni osservati nelle canne ad ance dell'organo, nei legni e negli ottoni d'orchestra che sottolineano i limiti di questo punto di vista e che fanno supporre l'intervento di parecchie risonanze della colonna d'aria. L'interesse di Bouasse per questi problemi mi serví da potente incentivo e valida guida quando, in seguito, intrapresi uno studio di questo argomento; i primi frutti di questi studi furono descritti in una serie di rapporti tecnici scritti nel 1958 per la C. G. Conn Ltd.

Entro il 1964 ero in grado di trattare abbastanza bene l'interazione tra una valvola ad ancia e una colonna d'aria con i vari massimi d'impedenza e potei quindi costruire un « corno silenzioso ». Questo « strumento » possiede vari massimi di impedenza d'ingresso scelti in modo tale da renderli incapaci di sostenere qualunque oscillazione in cooperazione con un'ancia, nonostante che la teoria di Weber-Helmholtz preveda la possibilità di oscillazioni. Nel 1968 con Daniel Gans pubblicai una relazione su questa teoria delle oscillazioni prodotte da piú risonanze. Questa relazione – basata sulla tesi di laurea di Gans alla Case Western Reserve University – comprendeva una descrizione del corno silenzioso e la spiegazione di vari fenomeni discussi da Bouasse. Da allora il lavoro è molto progredito nel nostro laboratorio, in particolare a opera di Waler Worman, che nel 1971 scrisse la dissertazione per la sua specializzazione sulla teoria delle oscillazioni multiple permanenti di questo tipo. Benché il suo lavoro fosse centrato sui sistemi del tipo del clarinetto, i risultati si applicano a tutti gli altri strumenti a fiato, compresi gli ottoni. Questi studi si sono giovati dei consigli di molti, tra i quali Bruce Schantz, Kent, Robert W. Pyle jr. e John H. Schelleng.

È necessario ora vedere, usando come esempio la tromba, in che modo la teoria di Weber-Helmholtz ha dovuto essere modificata. Quando il musicista emette un suono con la tromba, la colonna d'aria e le sue labbra funzionano in quello che chiameremo un regime di oscillazioni: uno stato di oscillazione nel quale parecchi massimi di impedenza della colonna d'aria collaborano col meccanismo della valvola formata dalle labbra per produrre energia sotto forma di un'oscillazione permanente composta da numerose componenti di frequenza armonicamente correlate.

Worman è riuscito a trovare in che modo un insieme di massimi di impedenza possa collaborare con la valvola dell'aria. La particolare « frequenza di suono » scelta dall'oscillazione (insieme con i suoi multipli interi) è tale da massimizzare la produzione di energia acustica, la quale si divide poi tra le varie frequenze che la compongono in maniera ben definita.

Esperimenti effettuati con gli strumenti piú disparati quali il clarinetto, l'oboe, il fagotto, la tromba e il corno da caccia mostrano che le note suonate debolmente sono dominate dal massimo di impedenza che appartiene alla nota nel senso di Weber e Helmholtz. Quando il musicista alza il livello dinamico, però, l'influenza delle risonanze piú alte cresce in una maniera ben definita che è comune a tutti gli strumenti. Mano a mano che suona piú forte l'influenza della impedenza di frequenza doppia di quella fondamentale diventa piú marcata, e per suoni ancora piú forti si uniscono al regime di oscillazione le risonanze a frequenze triple o quadruple. Uno sguardo alle curve dell'impedenza d'ingresso per una tromba moderna farà vedere che i picchi in regime di oscillazione cooperano, cosí che il suonatore può suonare varie note al suo strumento, comprese alcune che non corrispondono ad alcun picco, (*si vedano le figure delle due pagine seguenti*). Le note in quest'ultima categoria sono sempre state conosciute dai suonatori di ottoni e facevano parte della tecnica di suonare il corno ai tempi di Mozart e Beethoven.

La necessità di queste note, tuttavia, è stata ridotta grazie al meccanizzarsi dello strumento. Negli ultimi tempi esse sono tornate in auge; per esempio esse sono suonate dai musicisti che vogliono suonare pezzi da basso-trombone senza ricorrere a una speciale valvola azionata dal pollice che altrimenti sarebbe necessaria. Talvolta anche i suonatori di tuba trovano utile questa tecnica.

Forse il lettore si sta chiedendo cosa accade quando si premono le valvole di un ottone. Succede qualcosa di completamente nuovo? La risposta è no. La campana, il tubo e il bocchino determinano l'inviluppo, cioè l'andamento generale, della curva di risonanza; l'andamento dei picchi di una tromba sale nettamente andando dalle basse frequenze fino a circa 850 hertz, quindi scende e scompare alle alte frequenze. Quando si preme una valvola, aumentando cosí la lunghezza della tubolatura cilindrica nella parte centrale dello strumento, non si fa altro che spostare l'intera famiglia di picchi di risonanza a frequenze piú basse, senza modificarne però l'inviluppo.

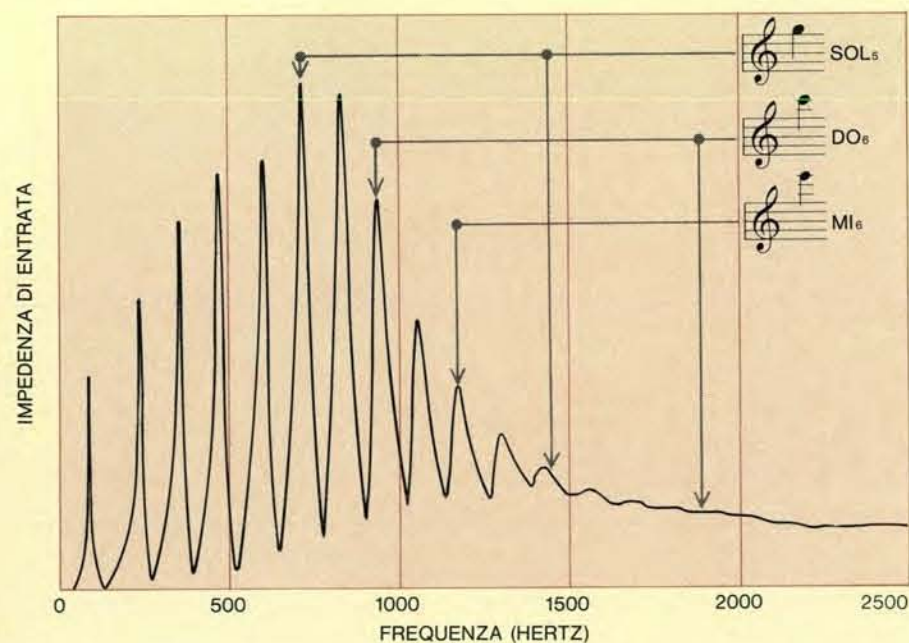
Oltre a trovare i dettagli dei regimi di oscillazione degli strumenti a fiato Worman ha chiarito i fattori che influenzano il timbro. Egli ha potuto dimostrare che negli strumenti con una valvola controllata dalla pressione (l'ancia o le labbra) la forza delle varie armoniche generate in un certo regime di oscillazione (misurato nell'interno del bocchino) ha una relazione particolarmente semplice quando lo strumento viene suonato a intensità basse o medie. Assumiamo per fissata l'intensità della componente fondamentale che coincide con la frequenza del

IMPEDENZA DI ENTRATA

0 500 1000 1500 2000 2500

FREQUENZA (HERTZ)

L'andamento dell'impedenza di una cornetta del XIX secolo è tipico della famiglia della tromba e del trombone. I picchi crescono gradualmente, quindi si abbassano bruscamente. Questa cornetta fu fabbricata nel 1865 da Henry Distin. Il terzo e il quarto picco di impedenza non seguono esattamente l'andamento dolcemente crescente che è richiesto per uno strumento veramente buono. Il difetto è dovuto principalmente a leggeri forzamenti e disassamenti riscontrati nei pistoni delle valvole.

Questo grafico di una tromba moderna serve per far vedere cosa accade quando un suonatore suona le note do_4 o sol_4. Quando soffia nello strumento si stabilisce un «regime di oscillazioni» nel quale molti massimi di impedenza della colonna d'aria collaborano con le vibrazioni delle sue labbra per produrre energia con un'oscillazione costante che contiene parecchie componenti di frequenza armonicamente correlate. Il regime di oscillazione per la nota do_4 implica il secondo, il quarto, il sesto e l'ottavo picco della curva. Quando il trombettista suona molto piano il secondo picco predomina ma, poiché questo picco non è molto grande, il principiante può facilmente produrre una nota oscillante. Suonando piú forte gli altri picchi acquistano piú influenza e l'oscillazione si stabilizza. L'oscillazione dominante per la nota sol_4 corrisponde al terzo picco di impedenza; dal momento che esso è piú grande del secondo, è piú facile suonare pianissimo sol_4 che do_4. Quando il trombettista suona piú forte interviene il sesto picco, piú alto, che rende sol_4 una delle note piú facili da suonare.

I regimi di oscillazione delle note piú alte fanno capire perché esse diventano sempre piú difficili da suonare quando ci si muove lungo la scala verso gli acuti. Do_5 è ancora facile da suonare perché il suo regime di oscillazione è dominato dal sesto picco d'impedenza che è alto; il dodicesimo picco contribuisce solo di poco. Do_6 è un po' piú difficile da suonare perché il picco dominante della nota è piú basso del picco per sol_5. Ci vuole un trombettista atletico per raggiungere mi_6 e le note ancora piú alte. A questo punto la tromba è virtualmente diventata un megafono: la produzione di energia dello strumento è dovuta quasi esclusivamente all'interazione della colonna d'aria con le labbra stesse e agisce proprio come la laringe umana per produrre suoni.

suono. Questa intensità, come ci si aspetta, aumenta quando il suonatore suona piú forte. Il risultato stupefacente di Worman è che quando il suonatore soffia debolmente non c'è praticamente altra componente nella vibrazione misurata nel bocchino, e che quando egli suona piú forte l'ampiezza della seconda armonica cresce in modo tale che al raddoppiarsi della forza della fondamentale corrisponde un aumento quadruplo della seconda armonica. Inoltre la forza di questa componente risulta essere circa proporzionale alla impedenza della colonna d'aria alla frequenza della seconda armonica. Analogamente, la terza armonica ha una forza che è proporzionale all'impedenza alla frequenza di questa terza armonica, e da un inizio ancora piú trascurabile essa diventa otto volte maggiore per ogni raddoppio della componente fondamentale. In breve, la ennesima armonica ha una forza proporzionale all'impedenza alla ennesima armonica della nota che viene suonata, e questa componente cresce con la ennesima potenza della ampiezza della fondamentale. La cosa notevole della scoperta di Worman è che essa è totalmente indipendente da tutti i dettagli della proprietà dell'ancia o delle labbra nel controllare il flusso, a patto che il flusso dipenda unicamente dalle variazioni di pressione nel bocchino (*si veda la figura in alto a pagina 20*).

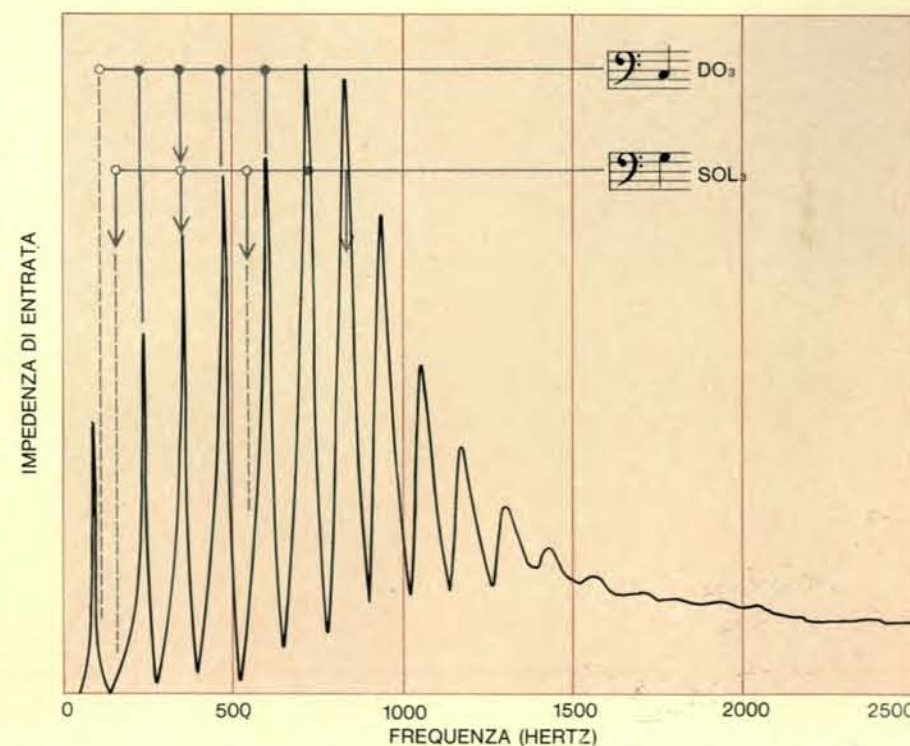
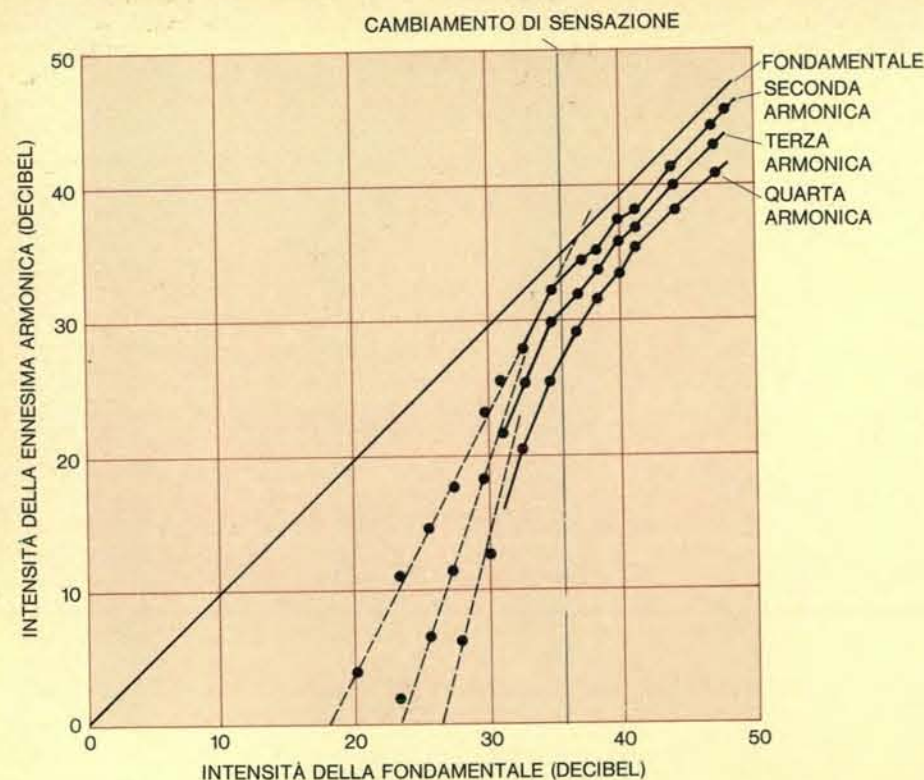
Riassumiamo ora quello che abbiamo trovato sullo svilupparsi del suono rilevato nel bocchino dallo strumento. Quando si suona molto piano è presente solo la componente fondamentale associata con la frequenza del suono. All'aumentare dell'intensità sonora la seconda armonica, la terza, la quarta e quelle ancora successive crescono progressivamente. Se per natura l'oscillazione è tale da implicare un regime in cui collaborano parecchi picchi di risonanza, le armoniche crescono nel semplice modo descritto dal teorema di Worman; solo per fortissime intensità sonore questo teorema non fornisce risultati semplici. Il teorema mostra inoltre che la forza delle varie componenti è proporzionale all'altezza dei vari massimi di impedenza che insieme formano il suono. In altre parole, quando si suona piuttosto forte, le intensità delle varie armoniche hanno altezze che, grosso modo, corrispondono alle altezze dei massimi di impedenza da cui sono principalmente sostenute. Quando invece un suono è generato sulla base di un solo picco di risonanza, come è il caso delle zone a frequenza piú alta del campo della tromba, sarà possibile descrivere l'intensità dei componenti solo potendo specificare l'esatto comportamento del sistema che regola il flusso d'aria.

Finora ho discusso solo la forza delle varie armoniche come sono misurate da un microfono sonda posto dentro al bocchino dello strumento. Quello che si sente in una sala da concerto, naturalmente, è molto diverso. La trasformazione dello spettro sonoro generato all'interno del bocchino, dove ha luogo effettivamente l'oscillazione, nello spettro che si ha nella sala da concerto, riguarda la trasmissione del suono dal bocchino attraverso la colonna di aria dello strumento e poi all'esterno oltre la campana. Ci sono molti aspetti complicati nel processo globale di trasmissione, anche senza tener conto delle complessità dell'acustica della sala o dalle complicazioni del nostro meccanismo percettivo, che compie un notevole lavoro per elaborare le grandi irregolarità delle proprietà della sala cosí da fornirci una impressione ben definita delle qualità musicali dello strumento. Voglio solo fare notare che la trasformazione dello spettro cosí come è all'interno del bocchino nello spettro esterno ha in generale la natura di un filtro passaalto. In altre parole, qualunque sia il suono generato nello strumento, sono le componenti piú alte che si propagano nella stanza (*si veda la figura in basso a pagina 20*).

Il fatto stesso che la campana di uno strumento faccia passare energia preferenzialmente ad alta frequenza ha due importanti conseguenze. Da una parte il filtraggio esalta la parte di energia ad alta frequenza che viene fuori dallo strumento; dall'altra serve a ridurre l'altezza dei picchi di impedenza ad alta frequenza i quali provocano la debole produzione di energia acustica ad alta frequenza dentro lo strumento. Da ciò risulta che le misure fatte fuori dallo strumento in una sala non forniscono altrettanti particolari sulla dinamica dell'intero sistema quanti ne danno le misure fatte dentro lo strumento.

Concludiamo ora questa discussione sulla fisica degli ottoni indicando alcune delle sue possibili applicazioni da parte dei musicisti e dei fabbricanti di strumenti. Per illustrare il modo in cui la fisica può aiutare il musicista citerò un mio articolo recentemente apparso sulla rivista « Selmer Bandwagon ». In questo scritto intendevo aiutare i suonatori di corno francese a chiarire e rendere sistematico il loro metodo di piazzare una mano sulla campana dello strumento per accentuare certe frequenze.

La mano del suonatore sulla campana è, dal punto di vista acustico, una parte della campana stessa.... Una mano correttamente piazzata fornisce picchi di risonanza fino a 1500 hertz su di uno strumento che altrimenti non avrebbe picchi visibili oltre i 750 hertz (*si veda l'illustrazione a pagina 21*). Supponete di trovare un corno che vi sia completamente sconosciuto (per esempio durante una visita a un museo se il custode vi apre la vetrina), e di voler conoscerne rapidamente le qualità musicali. Suonate una nota di media altezza (per esempio fa_3 in chiave di basso) e, tenendo la mano assolutamente piatta e diritta, spingetela dentro alla campana poco a poco, finché non sentite un leggero pizzicore sulla punta delle dita. A questo punto (tenendo sempre la mano perfettamente diritta) muovete la mano dentro e fuori finché il corno non suonerà il piú chiaramente possibile e avvertirete la vibrazione stabile nelle labbra. Chiunque vi stia ad ascoltare si troverà d'accordo sulla scelta della posizione finale. Sempre tenendo la mano tesa in questa posizione soffiate un suono che sia una ottava o una dodicesima del precedente (per esempio fa_4 o do_5). Tenendo sempre le punte delle dita nella posizione originaria piegate il palmo della mano cosí che la mano assuma una posizione piú familiare al suonatore di corno. Cosí facendo il suono si riempirà nuovamente, diverrà squillante e le labbra, vibrando, daranno una sensazione piú piena. La mano a questo punto sarà in un'ottima posizione per suonare tutte le note sullo strumento, anche se un esperto potrebbe ancora migliorare l'emissione dopo un'attenta pratica.

Muovendo la mano tesa dentro e fuori mentre suonate un fa basso potrete avere un altro aiuto esattamente calcolato per il suono. Il corno adesso funziona un po' come una tromba che suona sol_5 sul rigo superiore, mentre il mettere la mano piatta davanti serve a stabilire un regime analogo a quello che governa do_5 a metà del pentagramma nella tromba. Piegare il palmo della mano tenendo le punte al loro posto lascerà intatte le risonanze cosí sistemate, ma le renderà piú forti e quindi piú influenti. Ciò dà inoltre origine ad altri picchi nella zona dell'alta frequenza. La frequenza di questi picchi varia mentre la mano si piega cosí

Alle note le cui frequenze corrispondono a impedenze vicine ai valori minimi sono associati regimi di oscillazione insoliti. La nota do_3 è conosciuta dai musicisti come il suono del pedale. Il suo regime di oscillazione è tale che il secondo, il terzo e il quarto picco di risonanza della tromba sostengono un'oscillazione che si trova al valore comune della differenza tra le loro frequenze naturali. Poiché alla frequenza fondamentale c'è una perdita di energia, invece di un guadagno, nel suono è presente solo una piccola quantità di componente fondamentale, e anche questa viene convertita dalle componenti piú alte, per effetto della non linearità della caratteristica di controllo dell'aria per mezzo delle labbra del suonatore. La situazione per sol_3 è ancora piú insolita, in quanto la seconda e la quarta componente del suono sono la principale sorgente di energia oscillatoria, mentre la componente fondamentale e le altre armoniche dispari praticamente non contribuiscono perché l'impedenza alle loro frequenze è minima.

Il timbro del suono della tromba dipende dal fatto che le frequenze armoniche vanno a costituire una frazione crescente del suono emesso quando il suonatore suona piú forte. Le forze delle varie componenti armoniche sono riportate in un grafico in scala logaritmica (decibel), rispetto al logaritmo della forza della fondamentale. A livelli sonori medi e bassi ogni armonica si trova su una retta la cui pendenza è circa eguale al numero d'ordine dell'armonica. Suonando pianissimo, nel suono cosí come è rilevato nel bocchino non è praticamente presente alcuna armonica superiore. A ogni raddoppiarsi della forza della componente fondamentale la seconda armonica sale per un fattore quattro dal valore inizialmente piccolo. Analogamente la terza armonica aumenta con un fattore otto a ogni raddoppio della fondamentale, e cosí via. Questo risultato corrisponde a una teoria sviluppata da Walter Worman alla Case Western University. All'intensità sonora dove la relazione di Worman comincia a venir meno, il suonatore avverte un cambiamento di « sensazione » e gli ascoltatori percepiscono un cambiamento di suono. I dati che hanno permesso di costruire queste curve sono stati ottenuti con l'aiuto di C. Schlueter che è prima tromba nell'Orchestra del Minnesota.

La trasmissione del suono dalla tromba nell'ambiente è caratterizzata dalla « funzione di trasformazione dello spettro » che indica quale parte dell'energia acustica misurata nel bocchino viene emessa dalla campana per ogni frequenza. L'energia emessa cade di solito nella striscia qui riportata, secondo il livello sonoro e le caratteristiche dello strumento. La curva ha, qualitativamente, la natura di un filtro passa alto perché la campana lascia passare preferenzialmente l'energia corrispondente ad alte frequenze.

che il suonatore ha di nuovo un mezzo per accordarli in maniera da ottenere il migliore adattamento possibile con gli altri picchi che partecipano al regime. I suonatori di tromba talvolta trovano che sia interessante e tecnicamente utile adattare per i loro scopi la tecnica della mano dei suonatori di corno; questo specialmente per suonare passaggi utili in una tromba piccola.

È solo da pochi anni che si è cominciato a capire l'acustica dei bocchini. William Cardwell ha fornito una buona base teorica per trattare la relazione tra la dimensione dell'imboccatura e l'accordo dei vari picchi di risonanza.

A Cleveland, con l'aiuto di George Mc Cracken della King Musical Instruments Division della Seeburg Corporation, ci siamo occupati di come il disegno dell'imboccatura influenza l'altezza dei picchi di impedenza. Cito di nuovo dall'articolo per i musicisti per indicare le implicazioni pratiche dell'acustica del bocchino.

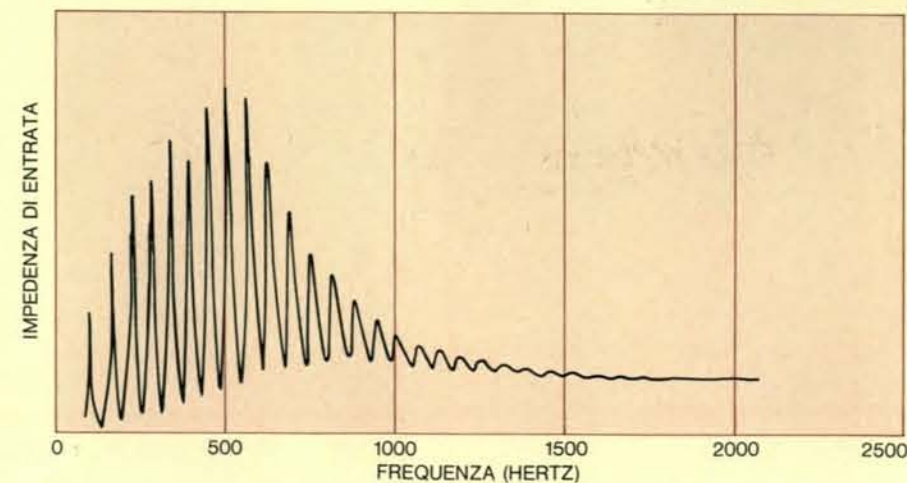
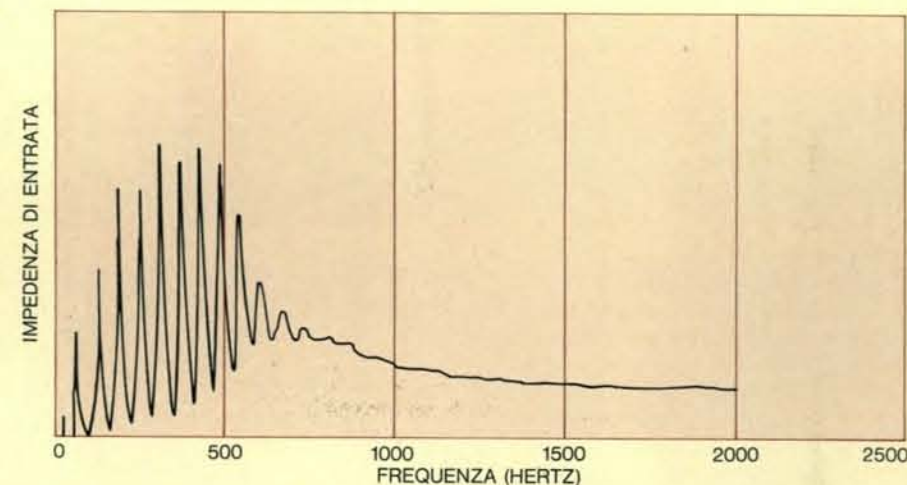
La teoria acustica ci dice che – primo e piú importante – un dato strumento richiede un bocchino con una ben definita "frequenza scoppiettante" che è quella che si ottiene quando la cavità è chiusa dal palmo della mano. In altre parole, la frequenza naturale piú bassa dell'imboccatura da sola, tappata, deve avere il suo giusto valore. È questa caratteristica che determina quali sono i piú alti dei picchi nella curva di risposta della tromba. Ciò contribuisce anche a far sí che i picchi in questa regione abbiano le giuste frequenze per accordarsi bene con i regimi alle note basse. La seconda necessità in ordine di importanza è che il suo volume totale sia giusto (tazza piú raccordo posteriore). Questo volume deve essere quello adatto perché i due o tre regimi di oscillazione inferiore funzionino correttamente ».

Finora ho discusso soltanto i fattori che contribuiscono a una favorevole oscillazione all'interno dello strumento e non ho detto nulla sull'intonazione dello strumento nel senso comunemente inteso dal musicista, cioè sulla relazione tra le altezze dei vari suoni che lo strumento può generare. Fortunatamente ciò che è necessario per una buona intonazione è quasi ciò che è necessario per una buona oscillazione. Per questo il fabbricante tradizionale di strumenti, accentrando la maggior parte della sua attenzione sulla intonazione delle note, era capace di sviluppare strumenti che avevano una buona « voce » e un buon tono.

Negli ultimi anni le conoscenze di acustica si sono accresciute e sono stati introdotti nell'uso i calcolatori; sono stati compiuti quindi degli sforzi per progettare dei buoni ottoni con l'aiuto dei calcolatori. Qui l'influenza dell'acustica degli altoparlanti è stata grande. Sono stati fatti dei grandi sforzi per mettere insieme matematicamente una serie di brevi segmenti di altoparlante, ognuno dei quali avrebbe dovuto rappresentare localmente la forma di uno strumento di ottone. Questo attacco « a pezzettini » del problema ha dei vantaggi dal punto di vista del calcolo.

Come si è visto, ogni volta che il cono di un corno ha una discontinuità di raccordo o di sezione trasversale, nascono delle anomalie nella forma dell'onda stazionaria. Nonostante ciò è sempre possibile, in linea di principio, trovare degli angoli e delle sezioni trasversali che sistemino i massimi di impedenza dello strumento con un'accuratezza accettabile dal punto di vista della intonazione. Benché gli strumenti costruiti in questo modo possono suonare perfettamente intonati, essi possono essere deludenti dal punto di vista musicale per aver trascurato i fenomeni piú sottili di interazione che in ultima analisi costituiscono la differenza tra la mediocrità e l'eccellenza. Inoltre, la capacità di uno strumento di suonare in maniera pronta e pulita all'inizio di un suono è influenzata moltissimo dalla presenza di discontinuità, cosí che, anche se queste discontinuità sono sistemate in maniera da bilanciarsi l'una con l'altra e dare un'ottima intonazione costante, ciò non vuol dire che lo strumento attacchi a suonare bene. Il musicista ovviamente vuole tanto un « attacco pulito » quanto un suono chiaro e costante.

Un buon fabbricante di strumenti acquista gradualmente una capacità quasi istintiva di sentire le sottigliezze di uno strumento, al punto che talvolta egli può essere veloce in modo stupefacente nell'uso delle sue conoscenze empiriche per trovare la giusta soluzione a un problema di accordo o di risposta dello strumento. Consideriamo il problema che questa persona deve risolvere quando deve correggere una tromba difettosa, la cui sola pecca è il comportamento del suono corrispondente a do_4. Supponiamo che il problema sia causato dal quarto picco di risonanza (contando dalle frequenze piú basse), che è troppo alto. Quando si suona pianissimo do_4 la nota sarà giusta, ma quando l'intensità sonora cresce la nota comincerà ad apparire un po' aspra perché il secondo membro del regime sonoro (il quarto picco mal regolato) comincia a far sentire la sua influenza. Il suonatore noterà anche che egli può spostare il suono in su e in giú per un intervallo considerevole di altezza senza che il timbro cambi apprezzabilmente. Egli si lamenterà che a questo livello sonoro moderato il suono « non è centrato ». Se suona piú forte l'influenza del terzo e del quarto membro del regime, bene intonati, diventa abbastanza forte da compensare in parte i difetti del secondo. Quando ciò accade il suonatore si accorge che il suono acquista di nuovo un nucleo, o centro, a certi livelli sonori, tornando di nuovo ben accordato perché tutte le risonanze, tranne una, hanno la giusta altezza.

Fisici, musicisti e fabbricanti di strumenti fanno uso di qualunque mezzo possibile per realizzare strumenti che aiutino nello sforzo creativo di fare musica. A prima vista sembrerebbe invece che il mezzo ideale fosse il calcolatore, e che sia possibile metterlo immediatamente al lavoro per progettare uno strumento perfetto. In pratica si trova che, benché gli scopi da perseguire siano sufficientemente chiariti, la complessità del problema è tale che è molto difficile specificarlo con sufficiente precisione da poterlo risolvere al calcolatore. Ho trovato che è molto piú efficace partire da uno strumento buono già esistente, ottenuto con i metodi tradizionali, e quindi applicare la conoscenza della fisica e le possibilità tecniche oggi disponibili per guidare il miglioramento dello strumento, sia che esso sia destinato a un singolo suonatore, sia che debba servire da prototipo per la produzione di serie.

Suonare con una mano sulla campana di un corno da caccia è una tecnica ben nota per estendere il campo di frequenza dello strumento. La curva in alto mostra la risposta di impedenza di entrata per un prototipo di corno da caccia esaminato senza la mano del suonatore sulla campana. Non vi sono praticamente picchi di risonanza oltre i 750 hertz. Se il suonatore cerca di raggiungere una nota come sol_5 (783 hertz), tutto quello che ottiene è uno stridore tremolante, perché non c'è ritorno di energia acustica dalla campana dello strumento per poter stabilizzare le note alte. Le note dell'ottava al di sotto di sol_5 sarebbero anche esse deboli e prive di carattere per mancanza di una forte retroazione. La curva in basso mostra i picchi di risonanza addizionali che si producono quando il musicista pone la sua mano appiattita sulla campana fino a sentire un leggero pizzicore nelle dita, e quindi piega leggermente il palmo. Lo strumento ora produce dei picchi ben al di sopra dei 1000 hertz, rendendo possibile al musicista di suonare con sicurezza la nota sol_5 e anche note piú alte, se necessario.

L'acquisto di una moglie presso i Sebei

In questa cultura africana l'uomo deve offrire in cambio di una moglie bestiame, denaro, vestiario, vasellame, tabacco, latte, birra e altri beni. Fino a che punto tale transazione è strettamente economica?

di Walter Goldschmidt

È noto che il matrimonio ha anche degli aspetti economici, ma in talune società questi aspetti si presentano in forma piú esplicita che in altre: la sposa o lo sposo si scambiano doni all'atto del matrimonio oppure è lo sposo che offre alla famiglia della sposa un tributo concreto. Le due forme di transazione, va sottolineato, sono sostanzialmente differenti: nel primo caso la dote va a beneficio della nuova coppia, nel secondo vengono favoriti solo coloro che la sposa sta abbandonando. Secondo la maggior parte degli antropologi questo trasferimento di beni alla famiglia della sposa non deve essere considerato alla stregua di un vero e proprio acquisto. Molti hanno addirittura suggerito di eliminare il termine compravendita. Per lo piú gli antropologi hanno sostenuto che i beni rappresentano una specie di « prestazione », definita come l'atto di pagare in moneta o in servigi quanto è dovuto per legge o per consuetudine. Sottolineando il fatto che gli uomini non acquistano una moglie per trarne profitto (malgrado in una società accada talvolta che una moglie venga rivenduta), si sono spinti tanto in là da negare in pratica qualsiasi economicità alla transazione. Per verificare la tesi secondo la quale la transazione sarebbe di tipo economico, un osservatore dovrebbe tendere a constatare che la società che sta studiando considera l'acquisto di una moglie allo stesso modo in cui noi consideriamo le transazioni economiche. Dovrebbe cioè considerare l'atteggiamento assunto verso il negoziato, i termini adottati, i loro rapporti con quelli di altri tipi di trattative e cosí via. Questo metodo tuttavia incontra due difficoltà: di fatto la società in questione come considera realmente la compravendita di una moglie? E cosa si intende con esattezza nella nostra società per transazione « economica »?

Il problema può essere affrontato in modo diverso. È sufficiente cioè che l'osservatore riesca a stabilire se gli obblighi matrimoniali della società in esame sono suscettibili di una semplice analisi economica. Un insieme di dati relativi al contratto matrimoniale portano o no a conclusioni che hanno un senso in termini di decisioni economiche? Con un metodo del genere non è necessario che il ricercatore sappia se la società considera gli obblighi del matrimonio sotto l'aspetto essenzialmente economico. Il problema non consiste piú nello stabilire se il contratto matrimoniale sia o no una transazione economica; è sufficiente che l'osservatore trovi una risposta a questa semplice domanda: fino a che punto le scelte sociali dipendono da considerazioni economiche prescindendo dai sentimenti?

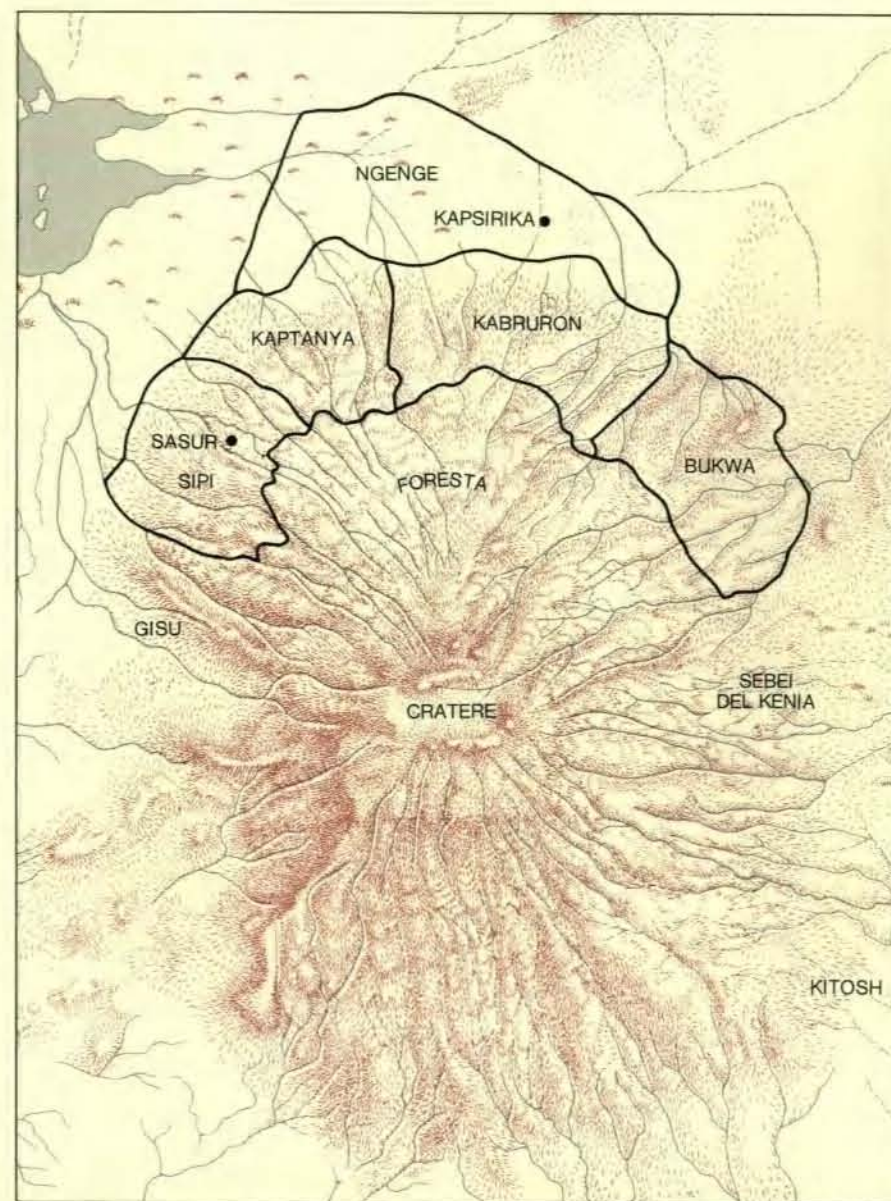
Mi sono dedicato a questo secondo metodo di indagine nel 1961-62 mentre lavoravo tra i sebei, un popolo del Nilo meridionale che vive sui pendii settentrionali del monte Elgon, in Uganda. Ho raccolto cosí le informazioni necessarie sui contratti nuziali stipulati da 79 uomini negli anni compresi tra il 1910 e il 1960. Il mio informatore era solitamente lo stesso uomo sposato o in alcuni casi il padre dello sposo. Questi informatori provenivano da due ambienti contrastanti della regione del monte Elgon. I dati relativi a 29 matrimoni provenivano da Sasur, una comunità agricola situata nel distretto di Sipi, ricco d'acqua e situato all'estremità occidentale delle pendici dell'Elgon. Si tratta di una zona di coltivazioni intensive rappresentate soprattutto da banane e caffè. I dati sugli altri 50 matrimoni provenivano invece da Kapsirika, una comunità pastorale situata nelle pianure piú aride del distretto di Ngenge alle pendici nord della montagna, dove l'economia dominante è costituita dall'allevamento del bestiame. Cosí gli uomini di Sasur sono essenzialmente contadini, mentre quelli di Kapsirika sono soprattutto pastori. Le spose degli uomini di entrambe le comunità non provengono solo da questi o dagli altri distretti della regione dei sebei, ma anche dai congiunti che si trovano oltre il confine, in Kenia e persino da tribú che non hanno alcun legame linguistico.

Io chiesi a ciascun informatore di rivelarmi l'ammontare totale pattuito per l'acquisto della loro moglie: quanto aveva dovuto pagare subito e quanto aveva promesso di pagare piú avanti. Chiesi anche se la loro unione era la prima o una successiva, qual era il luogo di origine della sposa, se costei era già stata sposata e chi aveva negoziato il contratto. Non ho alcun motivo per dubitare che le risposte che ho ricevuto fossero fondamentalmente esatte. Le trattative di matrimonio sono avvenimenti socialmente importanti. L'accordo viene raggiunto dopo una serie di contrattazioni condotte alla presenza di testimoni. Il contratto comporta il trasferimento di un grande quantitativo di beni e i suoi dettagli non sono segreti né privati. Naturalmente alcuni dei miei informatori possono aver minimizzato quello che restava loro ancora da pagare per assolvere al contratto, ma è logico che un uomo si dimostri reticente su argomenti del genere.

Come rivela il numero complessivo dei contratti a cui ho accennato, ho ricevuto piú risposte dai pastori di Kapsirika che dai contadini di Sasur. Ciò era in parte dovuto al fatto che i matrimoni poligamici sono due volte piú comuni tra i pastori. Le 50 risposte kapsirika rappresentavano piú della metà delle famiglie di questa comunità, mentre le 29 risposte sasur provenivano da poco piú di un terzo dei nuclei familiari. Non credo che questo squilibrio di risposte possa aver deformato i dati, mentre l'errore potenziale piú probabile è quello dell'esiguità del campione da me esaminato. Intendo perciò chiarire che le mie conclusioni si riferiscono soltanto ai sebei. Sebbene per il resto dell'Africa non siano disponibili particolari statistici sui reali pagamenti dei contratti nuziali, è noto che vi è in proposito una gran diversità di mentalità, di prospettive sociali, di diritti legali e di doveri individuali relativi ai pagamenti. Il fatto che quanto avviene presso i sebei sia applicabile a qualcuna delle culture strettamente correlate e a loro piú immediatamente vicine, trascurando gli altri popoli africani, esula dagli scopi di questa discussione.

La dinamica centrale della storia sociale dei sebei trae origine dagli sviluppi avvenuti nel XIX secolo o addirittura precedentemente. Primo tra questi fu un passaggio graduale da una economia prevalentemente pastorale a un'economia sempre piú interessata alla coltivazione. Non si sa esattamente quando abbia avuto inizio tale fenomeno, ma è certo che continuò anche dopo la colonizzazione europea dell'Africa orientale avvenuta nel XIX secolo. Questo cambiamento storico si riflette nelle variazioni economiche e sociali che si possono riscontrare oggi tra i sebei e che sono in gran parte risposte alle differenze ambientali. Come ho già detto, l'area in cui viene praticata l'agricoltura si trova all'estremità occidentale delle pendici dell'Elgon. I sebei che vivono a oriente di quest'area si occupano sempre meno dei raccolti, mentre sulle pianure semiaride che si estendono a nord della montagna l'allevamento continua a essere la principale fonte di vita.

Come molti altri allevatori africani di bestiame, i sebei sono organizzati in clan che riconoscono la parentela solo in termini di discendenza maschile. Ciò equivale a dire che del clan fanno parte solo i congiunti per parte di padre e non quelli per parte di madre. Per i sebei i rapporti all'interno del clan sono di grande importanza psicologica per molti aspetti. Per esempio, anche se l'autorità del clan non è direttamente coinvolta nelle trattative per i contratti nuziali, l'opinione dei membri ha una certa importanza nella scelta sia dello sposo sia della sposa. Inoltre il clan ha un interesse vitale per l'istituzione del matrimonio: infatti solo attraverso unioni legali e la

Il territorio dei sebei si trova sulle pendici settentrionali del monte Elgon, un vulcano spento situato in Uganda vicino al confine con il Kenia e a nord del lago Vittoria.

Il pendio settentrionale del monte Elgon si trova mediamente a una quota compresa tra i 1500 e i 2100 metri. A ovest vengono coltivate soprattutto le banane; a est le banane sono sostituite essenzialmente dal grano e quindi dall'allevamento del bestiame. Nelle pianure a nord della montagna viene praticato quasi esclusivamente l'allevamento.

prole che ne nasce la continuità del clan è assicurata, e la continuità del clan è uno scopo di fondamentale importanza.

Tra i sebei ogni donna e quasi ogni uomo si sposano. Anche se oggi vi è un certo numero di donne divorziate che vivono sole e riescono a tirare avanti abbastanza bene, si tratta di eccezioni: esse sono in certa misura criticate dagli uomini e, ritengo, invidiate dalle altre donne poiché sono riuscite a eludere l'autorità del maschio. L'essenza del matrimonio per i sebei è l'interesse del marito per la discendenza ed è questo interesse, riflesso a livello di clan, che costituisce il punto centrale del contratto nuziale. Con il pagamento di quanto pattuito, il clan dello sposo acquisisce un diritto legittimo sulla progenie nata dal matrimonio. La necessità per lo sposo di legittimare tale diritto del clan spiega perché, anche quando un uomo eredita la vedova del fratello o sposa una donna pluridivorziata, provvederà almeno a un pagamento simbolico: per esempio la consegna di un capo di bestiame alla famiglia della sposa. Ciò è alla base della convinzione, tipica dei sebei, che l'immortalità dipenda dall'avere dei discendenti. Il matrimonio è cosí un elemento fondamentale nella storia di ogni individuo e i figli sono di estrema importanza per entrambi gli sposi. Dal punto di vista sociale, la forma di matrimonio preferita dai sebei è la poligamia, che consente all'uomo di avere piú mogli contemporaneamente. Di solito un uomo si sposa per la prima volta a un'età compresa tra i 20 e i 25 anni, mentre la donna deve averne meno di 20. Il padre del giovane deve assumersi gli oneri del primo matrimonio del figlio e condurre di persona il negoziato. Egli può offrire il suo aiuto anche in occasione di successivi matrimoni, ma non vi è obbligo sul piano sociale ed è di solito il figlio che conduce le trattative. Anche se gli uomini sebei sono molto favorevoli alla poligamia, essa non è molto diffusa. Nell'arco di tempo coperto dalle mie ricerche, solo il 17% degli uomini sasur aveva avuto piú di una moglie alla volta. La poligamia era due volte piú comune tra gli uomini kapsirika, anche se piú del 60% erano monogami. Questo numero di matrimoni poligamici, seppur cosí limitato, basta a far sí che le donne scarseggino.

Tra i sebei il contratto nuziale è essenzialmente un accordo tra due uomini: il futuro sposo o suo padre da un lato e il padre della futura sposa dall'altro. Altre persone – in particolare fratelli, madri e zii materni della sposa – hanno un legittimo interesse per un possibile matrimonio e possono trarre profitto dal risultato delle trattative. In linea di principio tuttavia la scelta degli sposi dipende esclusivamente dai due uomini: neppure la futura sposa ha spesso voce in capitolo. Ho trovato molte prove a sostegno del fatto che ciò avveniva non solo in passato ma che in molti casi si verifica anche oggi, malgrado si tenda a evitare che le donne siano costrette a contrarre matrimoni indesiderati.

Oggi tra i sebei molti, se non tutti, i matrimoni sono preceduti da un periodo di tempo durante il quale i due giovani convivono semplicemente, una soluzione che i sebei di lingua inglese chiamano *elopement* (una specie di fuga romantica). Questo tipo di rapporto non viene criticato anche se si ritiene piú corretto stipulare prima un contratto. Un modo per stabilire questo rapporto, ora in declino, ma assai in voga in passato, è il ratto. Sembra che talvolta si ricorresse anche a un ratto simulato quando il matrimonio era avversato da uno a da entrambi i genitori. Comunque avvenisse la scelta, il rapporto stabilito con questo tipo di convivenza doveva poi essere legittimato con un passaggio di beni dalla famiglia dello sposo a quella della sposa. Ciò significa che in moltissimi casi le trattative avvengono quando l'unione è un fatto compiuto.

Durante le trattative il portavoce principale della sposa non è suo padre, la persona piú interessata, bensí un vicino che è legato al padre da un rapporto che sfiora la parentela (chiamato *latyet*). Il portavoce per lo sposo può essere il padre, un fratello o lo sposo stesso. Le parti interessate si incontrano nella comunità della sposa, di preferenza nella casa della madre. Parenti ed entrambe le parti, incluse donne anziane, possono presenziare alle trattative: in genere le donne restano sempre in silenzio, anche se alla fine possono muovere obiezioni o richiedere lo speciale compenso di una capra o di una mucca a riparazione di passati insulti rivolti loro dallo sposo o dagli uomini del suo clan. Su richiesta, gli uomini sebei possono indicare un prezzo medio, ma quello su cui si raggiunge l'accordo può scostarsi molto da esso. Sia assistendo alle contrattazioni sia discutendo con gli sposi e i loro rappresentanti i problemi impliciti nelle trattative, ho notato che la famiglia dello sposo affronta la riunione con ansia, temendo di non poter far fronte alle richieste della famiglia della sposa.

Secondo lo schema della contrattazione la famiglia della sposa fa una richiesta che la controparte può accettare, respingere o tentare di discutere. Secondo la procedura, il vicino per prima cosa chiede un certo numero di bovini presentando un bastoncino per ogni animale. Quando le due parti si sono accordate sul numero dei capi, i bastoncini vengono messi da parte e ne vengono portati altri che rappresentano pecore e capre: la procedura è identica. Si passa poi solitamente al denaro, quindi, in ordine non prefissato, ai tipi di beni che il padre della sposa ha deciso di richiedere. Quando si è raggiunto un accordo su ogni « voce », il contratto è definito, sebbene il padre possa anche richiedere un dono o pretendere il pagamento di una « multa » che non rientra affatto nel contratto.

Tuttavia in questa fase il contratto non è vincolante come lo sarebbe per noi. In teoria, una delle due parti può sempre rescindere il contratto fino a un momento particolare della cerimonia nuziale vera e propria, ma non può riaprire le trattative per modificare l'accordo, né prendere contatti con altri per un diverso matrimonio. Ciò è proibito finché il contratto provvisorio non viene annullato, e non ho mai sentito nessuno dei sebei lamentarsi per la trasgressione di questa norma.

L'acquisto di una moglie rappresenta per un normale sebei la spesa piú importante di tutta la vita. In rapporto al reddito, tale spesa si avvicina approssimativamente a quella che, nella nostra società, deve sostenere un individuo per comperare una casa. Da un esame delle singole voci dei contratti, apparve che i bovini avevano un peso notevole, di solito il maggiore, in tutti i 79 contratti di matrimonio. Oggetto di scambio in quasi tutti i matrimoni erano anche altri tipi di bestiame: per 72 di essi capre, e per piú della metà polli. Il denaro compariva in quasi il 90% dei contratti; bevande e tabacco erano presenti nel 70%; beni di consumo di minore importanza figuravano in meno del 12%: tra questi vi erano cherosene per le lampade, gin fatto in casa e latte.

Ogni contratto prevede sempre almeno un bovino e, in un certo periodo, tra gli effetti personali, figuravano sempre un braccialetto di ferro e una zappa per la madre della sposa; questa tradizione va scomparendo: le zappe comparivano in meno del 60% dei contratti e i braccialetti in meno di metà. Altri quattro tipi di effetti personali – coperte, abiti, pezze di tessuto, pentole di alluminio – incominciarono a essere incluse nei contratti negli anni venti: sembra che divenissero

Le trattative per la compravendita di una moglie, chiamate « rottura dei bastoncini », avvengono nella comunità della sposa, di preferenza nella casa della madre della sposa sebei. I contrassegni deposti sul terreno dal rappresentante del padre della sposa mostrano quanti beni di natura diversa la famiglia della sposa desidera ricevere. Il rappresentante dello sposo (*con il braccio teso*) può accettare o respingere la richiesta oppure tentare di ridurla. Il bestiame è il primo bene che viene trattato. In origine il padre della sposa tratteneva i contrassegni restituendoli allo sposo uno per uno man mano che venivano consegnati i singoli beni pattuiti nel contratto nuziale.

immediatamente popolari; le coperte comparivano nel 75% dei contratti e i vestiti, il tessuto e le pentole in almeno metà. Tra gli effetti personali, tutti introdotti dopo gli anni venti, si annoveravano vesti da uomo, pentole di ferro, padelle, zanzariere e lampade a cherosene.

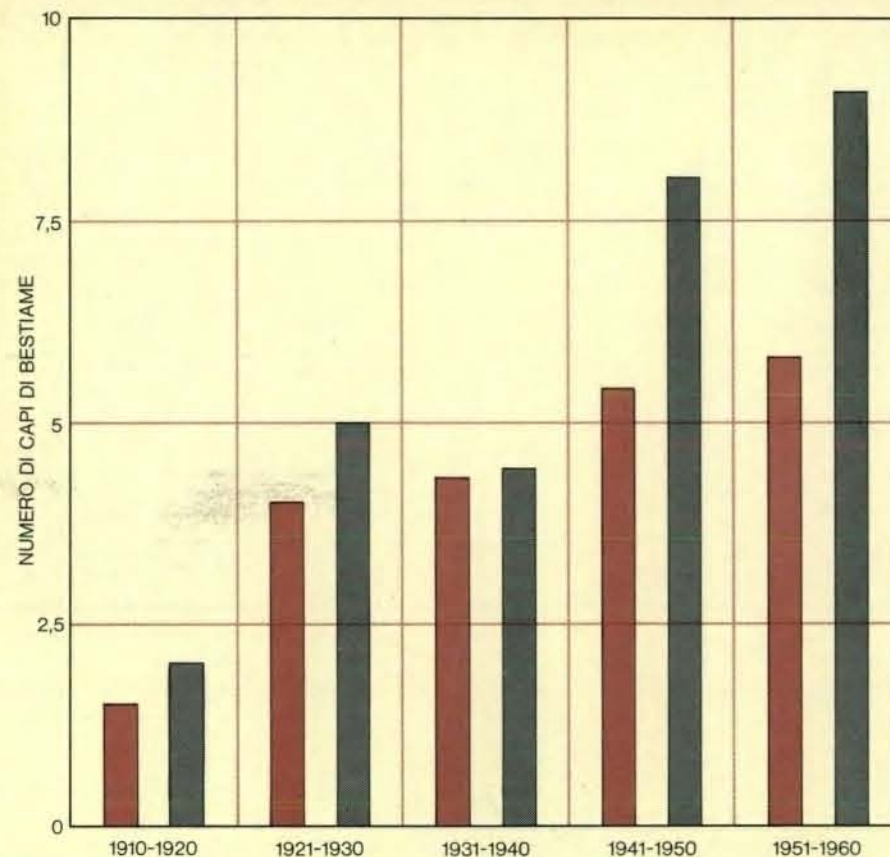
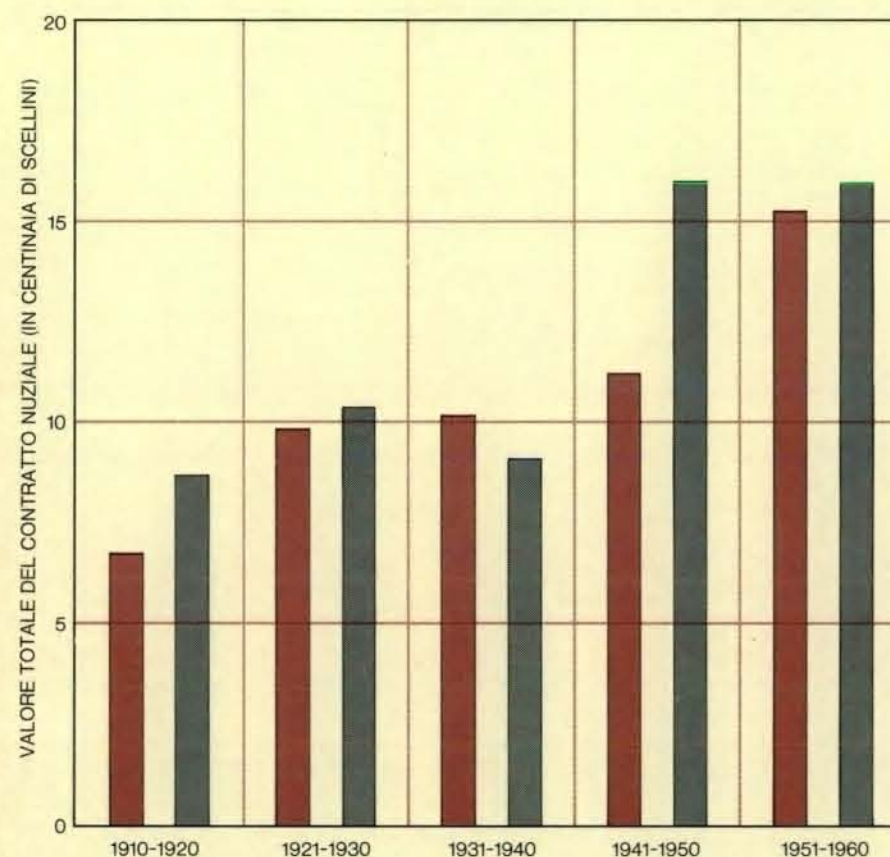
I sebei fanno distinzione tra i beni inclusi nel contratto negoziato e i doni. Questi ultimi possono essere richiesti dal padre della futura sposa e il futuro sposo può sentirsi in dovere di darglieli, ma non fanno parte del prezzo pattuito. Io ho limitato le mie analisi a tutto ciò che fa rigorosamente parte del contratto. Le « multe » che spesso gravano sullo sposo per qualche azione compiuta dagli uomini del suo clan non sono considerate parte del contratto nuziale e devono essere pagate separatamente, pertanto non sono comprese nei miei calcoli.

Come indica la priorità loro data, i bovini sono nei contratti sebei l'elemento fondamentale, probabilmente quello originario. Per rendere legale un matrimonio è necessario il passaggio di proprietà di almeno un capo. Anche le capre vengono regolarmente incluse nel contratto. In origine si trattava di un solo ariete destinato al fratello della madre della sposa. Ora ne vengono dati sei o otto. Birra, latte e forse tabacco sembrano essere tradizionali al pari del braccialetto di ferro e della zappa, ma gli altri beni di consumo e gli effetti personali sono aggiunte successive. Il cherosene come combustibile e le lampade per bruciarlo apparvero per la prima volta in un contratto del 1951; il gin distillato in casa fu menzionato per la prima volta nel 1955; il denaro è ormai quasi tradizionale e venne incluso nei contratti nel 1941 quando la valuta dell'Africa orientale era ancora la rupia.

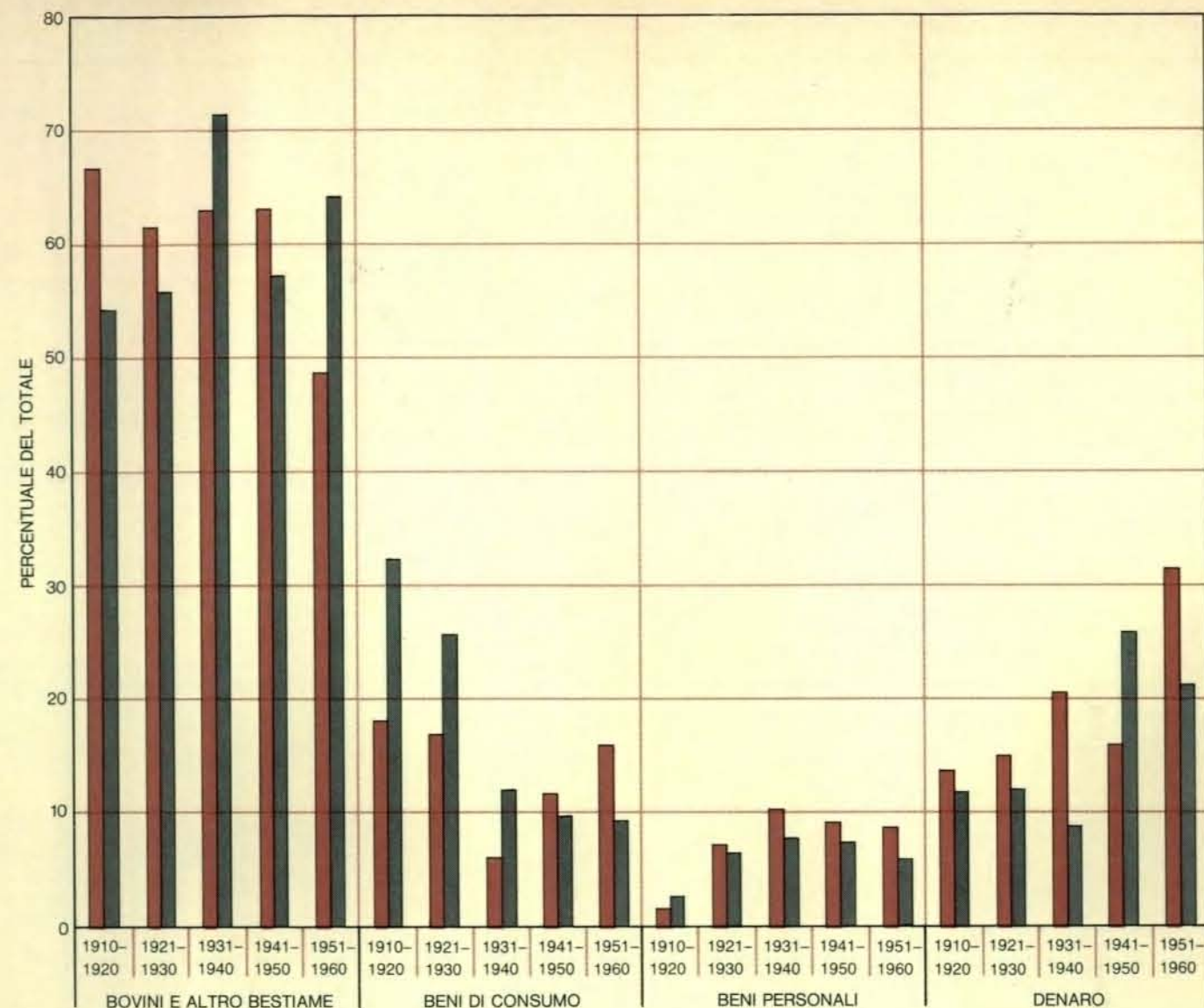
Per affrontare un'analisi economica dei contratti nuziali tra i sebei è necessario attribuire ai beni un controvalore in denaro. Ho usato come unità lo scellino dell'Africa orientale (equivalente a circa 85 lire); l'Uganda ha oggi la sua valuta, ma lo scellino era ancora usato al tempo delle mie ricerche sul luogo. Chiesi ai miei informatori di valutare secondo i prezzi correnti i beni che lo sposo doveva acquistare. In alcuni casi l'informatore ricordava il prezzo esatto pagato per qualche particolare oggetto e allora potevo servirmi nei miei calcoli del valore reale. Apparve ben presto chiaro che esisteva uno standard qualitativo da rispettare. Per esempio durante le contrattazioni il padre della sposa poteva esprimere il desiderio di ricevere un abito o una pentola di qualità migliore o di dimensioni maggiori del solito offrendosi di pagare lui stesso la differenza.

Ho attribuito al bestiame un valore standard di 100 scellini per capo (circa 8500 lire) nonostante il fatto che potesse subire ampie variazioni di prezzo e che i capi scelti per il contratto nuziale non fossero tutti della stessa qualità. Ho scelto questo valore perché rappresenta la cifra offerta dai sebei quando preferiscono pagare in denaro invece che procurare direttamente il bestiame. Secondo lo stesso sistema sono giunto a stabilire anche il valore in scellini delle capre e delle pecore. Ho trovato ulteriori conferme al fatto che il bestiame oggetto di contratto viene considerato di qualità uniforme: nessuno dei sebei ha mai cercato di spiegare un contratto apparentemente alto o basso riferendosi alla qualità del bestiame che aveva stabilito di offrire.

Il prezzo dei beni di consumo fu piú difficile da stabilire. Per la birra era fissato un prezzo di otto scellini per debe (quattro galloni imperiali), cosicché riuscii a calcolare il valore del denaro in base al numero di debe che i miei informatori annoveravano tra i loro conteggi di recipienti o sacchi di birra (per fare la birra i sebei fanno essiccare un infuso di grano fermentato su larghi teli stesi. Questa birra « essiccata » si conserva per molte settimane ed è fornita in sacchi nei contratti nuziali). Ho potuto servirmi di un'unità di misura dello stesso genere per valutare i contenitori di tabacco o di latte. Tutto sommato, ritengo che tali cifre costituiscano una discreta stima del valore, in scellini del 1962, dei vari beni contemplati in un contratto nuziale.

Naturalmente i prezzi sono molto cambiati nell'arco dei cinquant'anni a

Il grafico illustra il numero di capi di bestiame oggetto dei contratti nuziali di 29 mariti sasur e di 50 kapsirika nel periodo compreso tra il 1910 e il 1960. I sasur che vivono di agricoltura (*in colore*) hanno dato un numero inferiore di capi di bestiame.

Il prezzo complessivo di una moglie, nello stesso arco di 50 anni, è più che raddoppiato per i kapsirika e quasi triplicato per i sasur (*in colore*). La flessione del 1930 riflette la depressione mondiale e conferma la relazione tra contratti nuziali e prosperità.

cui si riferiscono i contratti sui quali ho raccolto le informazioni. Come è ovvio, non è possibile calcolare con precisione tale variazione, ma fortunatamente non è necessario. L'impiego di prezzi uniformi per l'intero periodo rappresenta un tipo di valutazione che gli economisti definiscono in scellini « costanti ». La progressiva diminuzione nello stesso periodo del potere di scambio dello scellino costituisce invece un problema piú serio. Per correggere i valori in modo da tener conto di questo fattore inflazionistico, è necessario un procedimento squisitamente tecnico, pieno di imprecisioni. Ho deciso quindi di non farvi ricorso e il lettore si ritenga avvertito che le mie analisi relative all'aumento dei prezzi nei contratti nuziali in un certo arco di tempo e alle diverse proporzioni delle varie classi di beni sono tutte influenzate da questo fattore in modo indeterminato.

Nell'arco di cinquant'anni, il prezzo piú basso mai pagato dai miei 79 informatori in un contratto nuziale è stato di 288 scellini (circa 21 000 lire) e il piú alto di 2943 scellini (circa 250 000 lire). Il numero di capi di bestiame variava da 1 a 17; il valore medio del bestiame si aggirava sulle 115 000 lire e il numero medio era di 6,65 capi. Non avrebbe senso tuttavia considerare il valore totale in lire dei contratti o quello del bestiame tranne che per quei valori che si riferiscono all'economia dei sebei. Sono comunque in grado di presentare alcuni termini di paragone grazie ai quali è possibile comprendere il significato di tali pagamenti. Un comune contadino che lavori per altri privati o per il governo riceve due scellini al giorno (170 lire); se lavorasse a tempo pieno (pochissimi lo fanno) il suo reddito annuo sarebbe di circa 600 scellini (circa 51 000 lire). Una cifra media non molto dissimile di 643 scellini (54 000 lire) risultava da un'inchiesta compiuta tra i miei informatori su quanto avevano guadagnato – da vendite o dal lavoro – nell'anno precedente. Si poté cosí constatare che le cifre pagate nei contratti nuziali dai sebei negli ultimi anni delle mie analisi (circa 1600 scellini negli anni cinquanta) equivale a un reddito medio di circa 30 mesi, escludendo quanto è necessario ai bisogni domestici. Il contratto nuziale è costoso anche se considerato in termini di capitale individuale. La terra è il capitale principale dei contadini di Sasur, ma poiché è difficile calcolarne il valore i miei confronti monetari sono applicabili solo agli uomini di Kapsirika. Il valore del capitale medio di un pastore kapsirika nel 1962 (calcolato a

I beni trattati nei contratti nuziali rientrano in quattro categorie: bestiame (in particolare bovini), beni di consumo (ad esempio birra), effetti personali (ad esempio vasellame e coperte) e denaro. Nell'arco di 50 anni la quota rappresentata dal denaro è aumentata, mentre è diminuita quella rappresentata dagli effetti personali per la variazione del potere d'acquisto.

100 scellini per capo di bestiame e a 18 scellini per capra) era di 2159 scellini (circa 183 000 lire). Ciò significa che il prezzo di circa 1600 scellini (136 000 lire) di un contratto nuziale medio equivale approssimativamente ai tre quarti del capitale totale di un kapsirika.

Le decadi tra il 1910 e il 1960 testimoniano un graduale progresso economico a lungo termine tra i sebei. All'inizio del secolo essi erano stati colpiti dal triplice disastro della siccità, delle epidemie e dalla dominazione europea. Per esempio, all'inizio del 1900, il bestiame era cosí scarso che alcuni pastori sebei furono costretti ad accontentarsi di capre e di pecore. Col passar del tempo, però, i beni che entrarono nei contratti nuziali divennero gradualmente piú abbondanti. In tali circostanze la teoria economica postula un incremento nella media dei pagamenti nei contratti nuziali. Un esame delle registrazioni dei matrimoni della comunità decade per decade mette in evidenza che la quantità media dei capi di bestiame inclusi nei pagamenti dei contratti nuziali era piú che raddoppiata verso la metà del secolo (*si veda l'illustrazione in alto nella pagina a fronte*). Questa tendenza è stata piú marcata tra i pastori kapsirika. Tra il 1910 e il 1920 il numero medio di capi di bestiame pagato da uno sposo kapsirika era di 2,4 capi; tra il 1951 e il 1960 tale media era salita a 9,1. Nel periodo 1910-1920 un contratto nuziale stipulato dagli agricoltori di Sasur prevedeva una media di 2,3 capi di bestiame. Anche queste cifre aumentarono con gli anni, ma si livellarono intorno a una media di 6 capi tra il 1951 e il 1960. Come il prezzo del bestiame, anche il prezzo totale pagato per un contratto nuziale era piú alto nella comunità pastorale che in quella agricola. Le tendenze, comunque, sono parallele. Il prezzo totale pagato dagli sposi di ambedue le comunità era ormai quasi triplicato: esso può perciò essere considerato un sintomo della crescente prosperità durante la prima metà del secolo, come sarebbe prevedibile in termini di teoria economica.

Questa relazione tra contratti nuziali e prosperità sembrerebbe riflettersi nel leggero declino verificatosi intorno agli anni trenta in tali contratti, in particolare presso i kapsirika. Non credo si tratti di una manipolazione statistica, ma di una reazione alla depressione mondiale degli anni trenta. Per esempio, nello stesso periodo, la proporzione dei capi di bestiame nel complesso

dei beni del contratto nuziale aveva subito un incremento. Tale variazione provocò una diminuzione del potere di acquisto dello sposo sia in termini di denaro che di beni di scorta, e contemporaneamente un aumento di quello relativo a un bene interno all'economia dei sebei: il bestiame, appunto. Poiché la mia formulazione dei dati riguardanti il contratto nuziale assegna un valore costante a ogni capo di bestiame, l'effetto di tale mutamento di proporzioni risulta mascherato. I miei informatori mi hanno riferito in altre occasioni che il prezzo del bestiame intorno agli anni trenta era molto basso. Inoltre, se i dati fossero sistemati in modo da rispecchiare l'aumentato potere d'acquisto del denaro in quel periodo, il ribasso del prezzo nei contratti nuziali sarebbe ancora piú forte.

Vi è un altro modo di constatare come i fattori economici si riflettano nel contratto nuziale: i diversi tipi di pagamento delle due comunità. Abbiamo già osservato che il prezzo è notevolmente piú alto tra i kapsirika che tra i sasur. Perché questo? Non si può sostenere che l'economia kapsirika sia piú florida: non è possibile ottenere i dati in base ai quali misurare tale prosperità relativa. È vero e significativo che i pastori fanno fronte ai contratti nuziali pagando soprattutto in bestiame, laddove gli agricoltori, che hanno maggiori riserve di denaro per la produzione del caffè, raccolto commerciabile, pagano preferibilmente in moneta, ma ciò non spiega perché, nel complesso, i pagamenti dei kapsirika siano piú elevati.

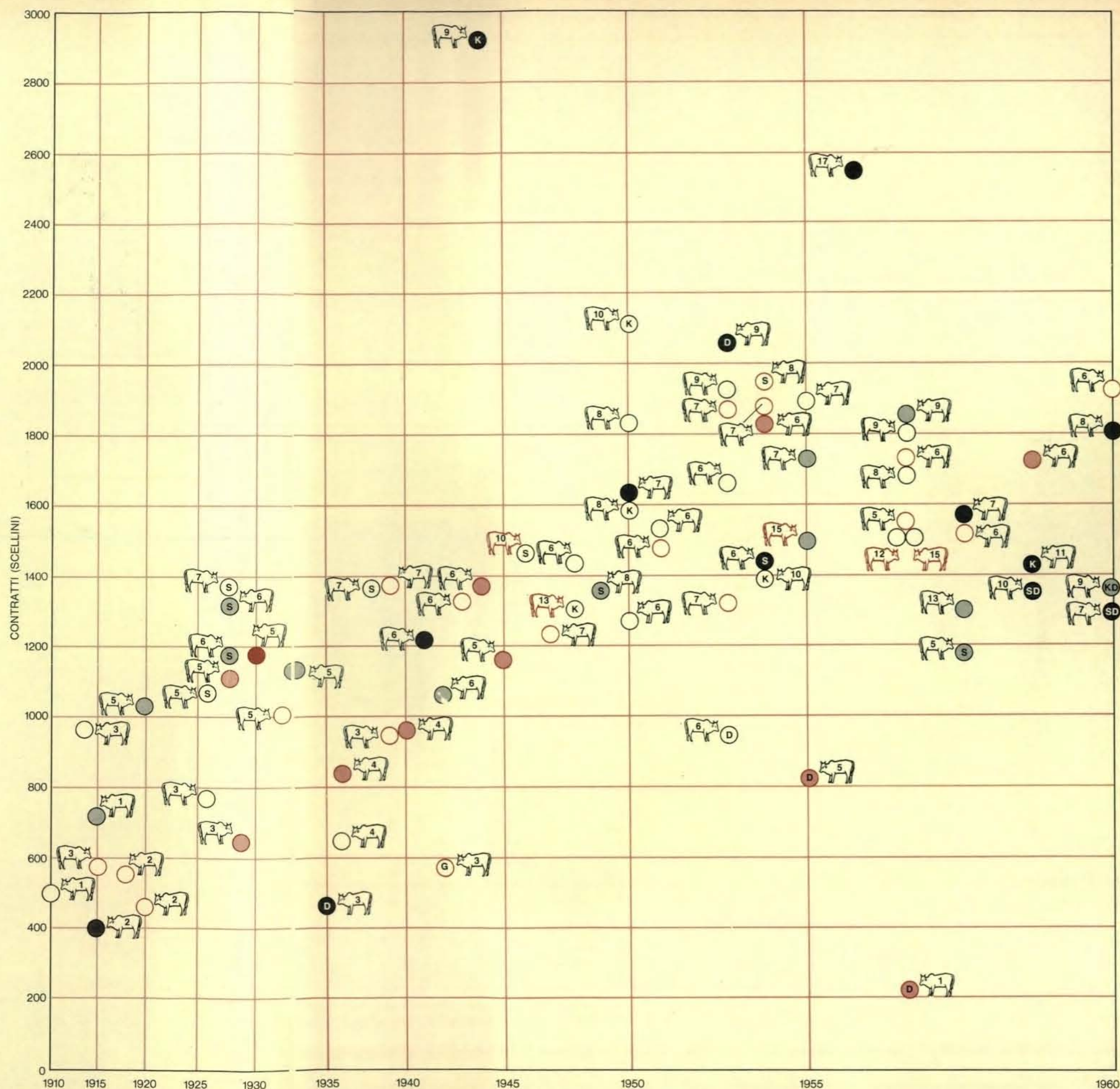
Per rispondere a questa domanda, dobbiamo considerare un altro aspetto delle consuetudini nuziali dei sebei: la relativa prevalenza della poligamia. Sebbene in genere gli uomini trovino auspicabile avere diverse mogli, soltanto alcuni di loro ne hanno piú d'una, anche se ciò è sufficiente a provocare una scarsa disponibilità di donne. È significativo in proposito il fatto che tra i sebei non esiste nulla che assomigli a una vecchia zitella. Piú matrimoni poligami si verificano, piú è difficile procurarsi una moglie. Per rendersi conto di tale scarsità bisogna calcolare il rapporto tra donne regolarmente sposate e uomini regolarmente sposati. In una società monogama il rapporto sarebbe di 1 a 1. Per Sasur il rapporto diventa 117 a 100 e per Kapsirika 151 a 100. Cosí la frequenza della poligamia nei matrimoni provoca un aumento dei prezzi e i kapsirika devono pagare contratti nuziali piú gravosi dei sasur.

Perché i kapsirika sono piú portati alla poligamia dei sasur? La ragione è essenzialmente economica. La poligamia si addice piú a un'economia pastorale che a un'economia agricola: l'acquisizione di piú mogli da parte degli agricoltori di Sasur è resa difficile dalle limitate possibilità della terra, mentre tali limitazioni non si verificano nella pastorizia. Le terre da pascolo sono aperte a chiunque abbia del bestiame.

Sebbene io non possieda alcuna informazione sul tasso di poligamia in tutto il territorio dei sebei, so che le diverse zone sono caratterizzate dall'importanza relativa assunta dalla pastorizia e dall'agricoltura. Generalmente l'agricoltura è piú diffusa nelle regioni occidentali e tale prevalenza diminuisce man mano che ci si muove verso est attraverso il pendio; è meno importante nelle pianure in cui vivono i kapsirika. In generale il prezzo di un contratto nuziale varia in funzione delle zone. Come ho potuto constatare, gli uomini impegnati in tali contratti erano tutti di Sasur o di Kapsirika,

UOMINI KAPSIRIKA
UOMINI SASUR
PRIMA MOGLIE
SECONDA MOGLIE
MOGLIE SUCCESSIVA
NUMERO DI CAPI
NUMERO DI CAPI RAZZIATI
D DONNE DIVORZIATE
S DONNE SEBEI DEL KENIA
K DONNE KITOSH
G DONNE GISU

CONTRATTI (SCELLINI)

I dati relativi ai contratti nuziali di 79 mogli sebei tra il 1910 e il 1960 sono riportati nel grafico qui a fianco. La posizione verticale di ogni cerchietto indica il valore complessivo del contratto in scellini. Le cifre riportate sull'animale immediatamente vicino al cerchietto rappresentano il numero di capi specificati nel contratto (se il simbolo è colorato significa che il bestiame è stato catturato in una scorreria). È evidente l'aumento dei prezzi sopravvenuto nell'arco di 50 anni, come pure la differenza tra i contratti relativi alla prima moglie e alle successive. I matrimoni avvenuti tra il 1926 e il 1946 tra uomini kapsirika e donne provenienti dal Kenia, ma di lingua sebei, erano caratterizzati da prezzi superiori alla media dello stesso periodo. Tuttavia furono gli uomini kapsirika che avevano sposato donne kitosh tra il '44 e il '50 che promossero la tendenza al rialzo dei prezzi.

mentre le donne provenivano da ogni parte del territorio dei sebei. Esaminando i prezzi pagati per queste donne, rilevai che esisteva una correlazione significativa tra l'importanza relativa della pastorizia nella zona e il prezzo medio delle donne provenienti da tali regioni. Il contratto nuziale è influenzato sia dal luogo di residenza dell'uomo sia dalla zona di provenienza della donna: quanto piú è pastorale la residenza del primo tanto piú alto è il prezzo richiesto.

In questa differenza nella poligamia c'è un altro aspetto che denota una prospettiva economica: le donne provenienti dalle zone agricole tendono a unirsi a uomini di quelle pastorali molto piú spesso di quanto non avvenga nella direzione opposta. Gli stessi sebei lo riconoscono quando sentenziano: « Donne, sposatevi all'est ». Non sono mai riuscito a sapere con certezza se con questa frase essi volessero indicare uno standard ideale o l'ammissione di uno stato di fatto, ma propenderei per la seconda ipotesi.

Per esaminare questo aspetto dobbiamo ritornare ai matrimoni delle due comunità. A Sasur, 25 dei 29 matrimoni avvennero entro il distretto di Sipi in cui si trova Sasur; una sposa proveniva da una tribú vicina della zona piú occidentale (dove l'agricoltura è anche piú intensa e il prezzo richiesto per una moglie era piú basso) e soltanto tre provenivano dall'est. Al contrario a Kapsirika soltanto 8 dei 50 matrimoni avvennero nelle zone di pianura. Si sposarono in quell'area donne provenienti da tutto il territorio dei sebei e persino da tribú esterne. Otto donne andate a spose a uomini kapsirika provenivano dal distretto di Sipi dove si trova Sasur.

Un esame piú approfondito dei matrimoni avvenuti in questi due distretti – Ngenge, dove si trova Kapsirika e Sipi, dove si trova Sasur – fornisce una prova ulteriore che l'ubicazione di entrambi gli sposi ha grande importanza per la felice conclusione del contratto nuziale. Vi furono 25 matrimoni nei quali un uomo sasur sposò una donna proveniente dal territorio circostante, cioè dal distretto di Sipi: il prezzo medio richiesto in questi casi era di 1192 scellini (101 000 lire). In otto matrimoni avvenne invece l'unione di uomini kapsirika con donne provenienti dal distretto di Ngenge: in questi casi il prezzo medio era di 1677 scellini (142 000 lire). Ciò significa una differenza di piú del 40%. Vi furono anche otto matrimoni tra uomini kapsirika e donne provenienti dal distretto di Sipi: il prezzo era di 1336 scellini (113 000 lire), cioè, come era prevedibile, un valore intermedio. È significativo il fatto che nel mio campione non vi fossero casi in cui un uomo sasur avesse ottenuto in moglie una donna ngenge.

Non esiste un costume standard per i matrimoni delle zone orientali tra i residenti nel Kenia di lingua sebei o tra i kitosh del Kenia, un gruppo di lingua bantù che ha fornito spose per gli uomini kapsirika. Sette uomini kapsirika hanno sposato donne kitosh e dodici hanno sposato donne di lingua sebei provenienti dal Kenia. I sebei sono consapevoli della tendenza al rialzo dei prezzi dei contratti nuziali con il trascorrere degli anni che, a loro giudizio, è provocata dal costo relativamente alto delle mogli provenienti dal Kenia. Il prezzo medio pattuito nei sette contratti nuziali con i kitosh fu di 1919 scellini (146 000 lire). I kapsirika si rendono conto che il prezzo kitosh è alto e che la maggior parte di esso è pagata in bestiame: la loro consapevolezza indica una buona capacità di apprezzamento circa le differenze di prezzo dei contratti nuziali. In linea generale, essi lamentano che le donne di lingua sebei provenienti dal Kenia hanno anch'esse contribuito al rialzo dei prezzi, ma ciò non è vero: il prezzo medio di una donna del Kenia di lingua sebei è di 1357 scellini (115 000 lire), vale a dire solo 21 scellini di piú della cifra media che uno sposo kapsirika paga per la figlia di un agricoltore del distretto di Sipi. Tuttavia, da un punto di vista piú generale, è vero che alcuni matrimoni tra i sebei e i loro congiunti del Kenia provocarono per la prima volta un rialzo del prezzo del contratto in generale (*si veda l'illustrazione grande della pagina precedente*). In questo senso l'opinione dei sebei è del tutto esatta.

Che cosa accade nelle trattative che hanno luogo dopo che l'uomo e la donna hanno già iniziato la loro vita in comune? Mettetevi al posto del padre della sposa e considerate ciò che fareste voi. Da un lato, sapete che il giovane è ormai impegnato e forse potreste richiedere un prezzo piú alto; dall'altro, anche vostra figlia è impegnata con quell'uomo e perciò vi sentite costretto a non interferire con i suoi desideri. È questo un caso abbastanza classico di contrasto tra il peso degli argomenti economici e l'inclinazione del sentimento. I sebei asseriscono che in tali circostanze l'uomo dovrà pagare un prezzo piú alto.

Negli anni quaranta e cinquanta vi fu un metodo per determinare il prezzo del contratto nuziale dopo una fuga senza ricorrere alle solite trattative. Semplicemente, il padre e il fratello della fanciulla « rapita » facevano un'incursione nel recinto del bestiame dello sposo asportandone il numero di capi che ritenevano opportuno in luogo del risarcimento contrattuale formale. Tra il 1946 e il 1957 si verificarono cinque imprese del genere, che coinvolsero tutte uomini di Kapsirika, com'era logico dal momento che i sasur non possedevano recinti pieni di bestiame. È comunque istruttivo esaminare come si svolgessero in dettaglio tali incursioni.

Due delle incursioni avvennero negli anni quaranta, quando un contratto medio si aggirava per i kapsirika sui 1595 scellini (135 000 lire). In un caso il numero dei capi di bestiame asportati fu di dieci, pari a un valore nominale di 1000 scellini; le contrattazioni che seguirono portarono a stabilire un prezzo complessivo di 1476 scellini. Nel secondo caso, vennero prelevati 13 capi e a ciò non fece seguito alcuna ulteriore contrattazione. All'epoca delle incursioni avvenute negli anni cinquanta il prezzo medio dei contratti nuziali era leggermente aumentato. In due occasioni vennero prelevati 15 capi di bestiame senza che seguisse alcun negoziato, in una terza ne vennero presi 12, ma il padre della sposa chiese in seguito – e la sua richiesta venne accolta – un pagamento ulteriore di 300 scellini. Questi cinque casi dimostrerebbero che entrambe le parti coinvolte in un matrimonio si adeguano idealmente a un modello di comportamento relativo al contratto nuziale e sono piuttosto sensibili alle fluttuazioni di prezzo.

Le incursioni sono vantaggiose per molti aspetti; uno di questi consiste nel fatto che lo sposo finisce per pagare un prezzo che in un certo qual modo è inferiore alla media: ciò riflette – ritengo – piú i fatti concreti che un errore di calcolo. L'uomo che compie l'incursione nel recinto del proprio genero prende possesso immediatamente del suo bestiame, e non deve aspettare per un tempo che può anche essere notevolmente lungo; inoltre, poiché la scelta dei capi dipende esclusivamente da lui, può anche scegliere animali di qualità superiore. Anche il genero, in definitiva, può trarne dei vantaggi sebbene non abbia parte attiva nella questione: molti sposi non gradiscono le numerose, piccole richieste previste normalmente in un contratto nuziale; alcuni affermano addirittura che preferirebbero effettuare il pagamento in bestiame piuttosto che in altri beni, come fanno gli uomini che sposano donne kitosh, per sbarazzarsi dalle noiosità che tali obblighi minori comportano.

Su un piano strettamente economico, senza tener conto dei sentimenti, il contratto per una divorziata dovrebbe comportare una spesa minore di quella richiesta per una donna nubile. Per i sasur infatti il principale incentivo al matrimonio è costituito dal desiderio di avere dei figli. I dati in mio possesso avvalorano questa ipotesi. Tra gli uomini che sposarono delle divorziate nel periodo compreso tra il 1953 e il 1961 vi erano quattro kapsirika e due sasur. Delle donne, nessuna era la prima moglie del suo secondo marito. Quelle che sposarono i due sasur erano del luogo ed entrambe divennero seconde mogli. Una, che si era sposata nel 1957, aveva già avuto parecchi mariti: suo padre chiese solo un pagamento simbolico di 226 scellini (20 000 lire) che rappresentava la cifra piú bassa di tutti i contratti presi in esame. Anche due delle divorziate che sposarono i kapsirika divennero seconde mogli, le altre furono rispettivamente la terza e la quarta moglie; di queste solo una era del luogo: due appartenevano a una tribú consanguinea del Kenia e l'altra era una kitosh.

Fatta eccezione per la pluridivorziata, la cifra pattuita per le altre cinque mogli era in media di 1131 scellini paragonata a quella media di 1568 scellini fissata nei contratti sebei nel periodo 1951-1960. Un solo contratto, tra quelli esaminati, stabiliva per una divorziata un prezzo uguale o superiore a quello consueto per una prima moglie, ma si trattava di un caso eccezionale. Un kapsirika stava prendendo accordi con il padre di una ragazza della regione di Bukwa, una zona abitata da pastori, quando questa fuggí con un altro. In seguito, la ragazza ruppe la relazione e sposò il pretendente kapsirika che pagò a suo padre 2064 scellini. A causa della precedente fuga, l'uomo che la sposò la considerava una divorziata, ma la cifra richiesta dal padre e pagata dallo sposo fa pensare che la sua condizione di divorziata fosse solo nominale. Tutto sommato, sembra quindi che tra i sebei il contratto di matrimonio per le divorziate comporti una spesa minore, proprio come previsto dalle teorie economiche. Anche se la poligamia contribuisce ad aumentare il livello generale di un contratto nuziale, non ne consegue necessariamente che una seconda moglie debba costare piú delle altre. In realtà, non esiste teoria economica in grado di spiegare la differenza di prezzo per la seconda moglie, la terza e quelle successive rispetto alla prima, se non la legge della diminuzione di profitto – e questo, chiaramente, non è l'atteggiamento assunto dai sebei. Gli uomini di razza sebei affermano che il prezzo pagato per la seconda moglie e per quelle successive è superiore a quello per le prime mogli. Pur non confermando questa asserzione, i dati suggeriscono interessanti rapporti tra il contratto nuziale e l'ordine delle mogli. 41 dei 79 matrimoni sebei avvenuti tra il 1910 e il 1960 erano tra lo sposo e la sua prima moglie. Dei mariti, 23 erano kapsirika e 18 sasur. Il prezzo medio previsto dal contratto per le prime mogli era di 1366 scellini. 24 matrimoni, di cui 10 sasur e 14 kapsirika, erano con seconde mogli; altri 14, tutti con mariti kapsirika tranne uno, erano con terze mogli o con mogli successive. Il prezzo medio per una seconda moglie era di 1177 scellini, quello per una terza moglie o successiva era di 1522 scellini. Appare evidente che gli uomini pagavano meno per le seconde mogli che per le prime. Il gruppo delle seconde mogli comprende però quattro divorziate. Qual è l'ammontare medio del contratto per le seconde mogli, una volta eliminate le divorziate che sono meno care? La cifra sale da 1177 a 1249 scellini, ma questo prezzo, benché alto, è sempre inferiore a quello previsto per una prima moglie, tanto che con la differenza si potrebbe acquistare una mucca. L'affermazione dei sebei che tutte le mogli successive alla prima costano care è chiaramente errata. Risulta piuttosto che il contratto per la seconda moglie prevede una cifra bassa e quello per la terza moglie una cifra alta.

Questo errore di concezione si spiega con il fatto che non è il marito, ma

UOMO SIPI DONNA SIPI
UOMO NGENGE DONNA SIPI
UOMO NGENGE DONNA NGENGE
0 500 1000 1500 2000
PREZZO MEDIO DI CONTRATTO (CENTINAIA DI SCELLINI)

I contadini pagano meno le spose e ricevono cifre inferiori per le figlie; inoltre, quando i loro figli si sposano tra loro, il prezzo richiesto è basso. Il contrario avviene per i pastori, presso i quali il prezzo medio è alto. Il prezzo si mantiene sulla media quando i pastori sposano le figlie dei contadini. I matrimoni tra contadini e figlie di pastori sono rari e nel campione esaminato non se ne è verificato nessuno.

PAGAMENTO MEDIO PER LA PRIMA MOGLIE (NUMERO): 18, 23
PAGAMENTO MEDIO PER LA SECONDA MOGLIE (NUMERO): 10, 14
PAGAMENTO MEDIO PER LA MOGLIE SUCCESSIVA (NUMERO): 1, 13
0 500 1000 1500 2000
CENTINAIA DI SCELLINI

Le mogli successive, che i sebei ritengono piú costose della prima, non hanno comportato prezzi sensibilmente superiori. I contratti relativi all'acquisto di 24 seconde mogli erano in media inferiori a quelli relativi a 41 prime mogli. Invece le terze mogli, o le successive, ebbero un prezzo medio superiore sia a quello delle prime sia a quello delle seconde mogli, seppure con una notevole variabilità dei costi individuali.

suo padre a far fronte al contratto per il primo matrimonio, mentre di solito è lo sposo che si assume da solo la spesa di unioni successive. Esiste una forte pressione sociale che induce i sebei a prendere una seconda moglie: il marito tende perciò a contrarre un secondo matrimonio anche se è appena in condizioni di permetterselo. Data la situazione, è logico che egli cerchi il contratto piú favorevole; un sebei perlomeno ha ammesso candidamente che alla base del suo secondo matrimonio con una donna che costava poco vi erano dei motivi economici.

La pressione sociale non è cosí forte quando si tratta di mogli successive. Tali matrimoni di solito avvengono quando l'uomo è piú anziano ed è in migliori condizioni economiche. Poiché può permettersi di pagare di piú, il padre della sposa può chiedere una cifra piú elevata di quella che potrebbe ottenere da un uomo piú giovane. Può anche trarre vantaggio dal fatto che la figlia è restia a contrarre una simile unione: in genere, anche se non sempre, le donne di razza sebei preferiscono i giovani. Alcuni pretendenti poligami desiderano semplicemente possedere una terza o una quarta moglie piuttosto che sposare una donna particolare, e in questo caso cercheranno i contratti piú convenienti. Di conseguenza, questi matrimoni successivi, benché in media piú costosi dei primi, presentano una grande varietà nei prezzi dei singoli contratti. Tra i 14 contratti, per una terza moglie o per mogli successive, presi in esame, se ne trovano tre dei quattro piú cari e due di quelli piú a buon mercato stipulati tra i sebei in tutto l'arco dei cinquant'anni.

Per verificare l'ipotesi che il terzo e il quarto matrimonio sono in larga misura prerogative dei ricchi, ho studiato le condizioni economiche dei 27 kapsirika che si sono sposati tra il 1950 e il 1960. Domandai se il valore del loro bestiame era superiore o inferiore alla media generale, se l'ammontare del loro reddito in contanti era al di sotto o al di sopra di quello medio per i kapsirika. Undici dei contratti erano per i primi matrimoni; il bestiame di dieci uomini e il reddito di nove erano inferiori alla media. Ciò naturalmente non costituisce un ostacolo, poiché gli oneri del primo matrimonio sono a carico del padre dello sposo. Sette contratti erano per seconde nozze; tutti e sette gli uomini erano vicini alla media sia per numero di capi di bestiame sia per reddito in contanti. Dei sei che contrassero un terzo matrimonio, solo due erano al di sotto della media quanto a denaro contante e uno solo quanto a bestiame, mentre i tre che avevano contratto un quarto matrimonio erano tutti al di sopra della media. È evidente che, indipendentemente dal prezzo pagato, il terzo e il quarto matrimonio riguardano solo i benestanti.

Un aspetto degli accordi presi tra i sebei che differisce dagli obblighi contrattuali della società occidentale consiste nell'assenza di clausole temporali. Eppure i sebei si rendono perfettamente conto del costo del ritardo: infatti danno regolarmente un manzo al posto di una giovenca che dovrà essere consegnata in futuro, ma in data non prestabilita, poiché riconoscono alla giovenca un valore molto superiore a quello del manzo. Questa assenza di clausole temporali si rileva anche nei contratti nuziali come nel caso di scambi di altro genere e, da discorsi fatti con i sebei, si trae l'impressione che durante le trattative il padre di ogni futura sposa si domandi se il genero adempirà agli obblighi assunti con ragionevole prontezza. Questa preoccupazione non è priva di fondamento. Nel 1961 solo 4 dei 39 sebei che si erano sposati dopo il 1950 avevano adempiuto completamente agli obblighi previsti dal contratto. Quanto restava da pagare ammontava in media al 24% del valore totale. Sotto questo aspetto, gli agricoltori sasur erano anche peggiori dei pastori kapsirika: la quota non pagata, di sette contratti stipulati dai sasur dopo il 1950, era in media superiore al 34% del valore totale, mentre quella accertata per i kapsirika nell'intero decennio corrispondeva solo al 18%. Se ai matrimoni kapsirika del periodo 1951-1960 avessi aggiunto anche i tre casi in cui il bestiame era stato prelevato direttamente dal recinto dello sposo, la quota media non corrisposta dai pastori sarebbe scesa a 11%.

Nell'arco di cinquant'anni, il costo di una moglie tra i sebei presenta notevoli variazioni, determinate evidentemente da fattori contingenti di tipo essenzialmente economico. Per esempio, l'aumento a lungo termine del prezzo è in relazione con il graduale miglioramento delle condizioni economiche verificatosi dopo gli anni difficili all'inizio del secolo. Quando la situazione si stabilizzò negli anni cinquanta, anche il prezzo dei contratti nuziali rimase costante.

Un altro esempio dell'influenza esercitata da fattori contingenti è costituito dal fatto che nelle zone ricche di bestiame i contratti nuziali sono uniformemente piú elevati che nelle zone dove il bestiame è scarso. Ciò si verifica non solo quando la regione della sposa è ricca di bestiame, ma anche quando lo è quella dello sposo. Nelle zone povere di bestiame, gli uomini che si sposano pagano il prezzo piú

Il confronto tra i capi di bestiame trattati nei contratti kapsirika (*in grigio*) e nei contratti sasur (*in colore*) dimostra che i pastori operano questo tipo di scambio piú facilmente degli agricoltori. Il numero di capi trattato era per lo piú di sei. Il numero piú alto mai raggiunto dai sasur si è verificato in un contratto che prevedeva otto capi; ben 22 contratti kapsirika hanno invece raggiunto o superato questa cifra.

basso. Uomini di zone pastorali che sposano donne del luogo o appartenenti ad altre tribú di pastori pagano il prezzo piú alto. Infine, uomini di comunità pastorali che sposano donne provenienti da una zona agricola pagano un prezzo intermedio. Quando si tenga conto anche dell'effetto del pagamento differito, molto diffuso nelle zone agricole, la differenza tra il prezzo di una moglie nelle comunità ricche di bestiame e in quelle povere aumenta ulteriormente.

Se tra i futuri sposi esiste già una relazione, il marito ha minori possibilità di contrattare, di conseguenza il prezzo è piú alto di quello stabilito in precedenza, poiché il padre della sposa può approfittare della situazione per aumentare le proprie richieste. Per una divorziata il prezzo è invece ridotto: questo non si verifica soltanto perché gli effetti personali e i beni di consumo vengono in gran parte eliminati dal contratto, né solo perché le divorziate non vengono mai prese come prime mogli, ma piuttosto perché i sebei attribuiscono grande importanza alla prole e una divorziata che ha sfruttato in un precedente matrimonio parte del suo periodo di fertilità è di valore ridotto per il suo secondo sposo.

Anche il fatto che gli uomini poligami pagano la seconda moglie meno della prima, ma si accollano un costo maggiore per la terza e le successive riflette precise circostanze economiche. Il prezzo della prima moglie è a carico del padre dello sposo, mentre è il marito stesso a pagare per le successive. Gli uomini prendono una seconda moglie quando le loro condizioni economiche sono intorno alla media, solo le persone piú anziane e piú ricche ne prendono in genere una terza o una quarta.

Le considerazioni di tipo economico hanno dunque un peso rilevante per i sebei quando si tratta di scegliere una moglie o di accettare un marito per la figlia. È una scoperta significativa sotto molti aspetti: getta un po' di luce sull'atteggiamento dei sebei verso il matrimonio e verso le relazioni con altre persone in generale. Rivela inoltre che, analizzando l'insieme delle transazioni compiute da questo popolo, si possono ottenere risultati significativi.

Il fatto che i contratti nuziali possano essere analizzati in termini economici non deve assolutamente far concludere che il matrimonio sia per i sebei una questione esclusivamente economica. A determinare il prezzo concorrono anche fattori sociali: è difficile, se non addirittura impossibile, quantificarli, tuttavia esistono realmente. Mi sembra di risentire le parole di un uomo sebei che mi disse a proposito di un contratto particolarmente caro: « Era un prezzo molto alto, ma io la desideravo moltissimo ». Come appare dai dati, il prezzo può variare nel giro di un solo anno molto piú di quanto si possa spiegare ricorrendo esclusivamente a motivazioni economiche. Ho visto uomini preoccupati e in ansia durante le trattative domandarsi « Quanto dovrò pagare? ». Ho anche visto il padre della sposa ritirare uno dei bastoncini presentati dal suo intermediario, rinunciando cosí a chiedere un prezzo piú elevato, come avrebbe potuto. Chi abbia assistito a queste scene non può dubitare che nelle trattative nuziali dei sebei siano implicati anche molti sentimenti sociali.

Un altro motivo, ancora piú determinante, che impedisce di considerare esclusivamente economico il tipo di matrimonio in uso tra i sebei, è il fatto che quest'ultimo avviene in un contesto di definizioni di natura chiaramente culturale. Ne è esempio la convinzione che per legalizzare un matrimonio sia necessario consegnare una mucca alla famiglia della sposa. Questo passaggio di proprietà rappresenta la rivendicazione formale da parte del clan dello sposo al possesso della prole nata dal matrimonio. Una cessione di bestiame è indubbiamente un atto le cui conseguenze economiche possono essere espresse in termini quantitativi, è però anche un atto basato saldamente su aspettative legittime e su convinzioni sociali. Convinzioni sociali di questo tipo si manifestano ripetutamente in tutte le forme di rapporto che il matrimonio comporta: importante, per esempio, è il rispetto che genero e suocero devono mostrarsi reciprocamente e che ciascuno dei due dimostra in vari modi. Concludendo, il fatto che il contratto nuziale dei sebei sia suscettibile di analisi economica rivela molte cose su questa gente, ma non tutte: crederlo significherebbe sottovalutare la complessità delle motivazioni umane. Pur tenendo presente questa considerazione, è però legittimo affermare che un uomo sebei, per quanto sentimenti ed emozioni possano influire sul suo desiderio di sposarsi, deve affrontare al tempo stesso la realtà economica della società in cui vive e compie la sua scelta in un contesto economico.

La sequenza dei prezzi raggiunti nei contratti nuziali kapsirika (*in grigio*) e sasur (*in colore*) indica che il valore piú comune si aggirava tra i 1300 e i 1400 scellini (cioè tra le 110 000 e le 119 000 lire). Piú della metà dei contratti kapsirika superavano questo livello, mentre piú della metà dei contratti sasur non lo raggiungevano. Solo alcuni contratti sasur erano elevati: sei toccarono i 1800 scellini (153 000 lire).

Meteoriti e radiazione cosmica

Prima di cadere al suolo una meteorite ha subito nel vuoto un bombardamento di particelle di raggi cosmici. I prodotti nucleari di questo bombardamento racchiudono indicazioni sulla storia del sistema solare

di I. R. Cameron

Una delle più interessanti domande in astrofisica è la seguente: In che modo, dalla nube diffusa di polvere e di gas interstellare, si è formato il sistema solare? Altra domanda interessante: Qual è la natura e l'origine dei raggi cosmici, le particelle ad alta energia che penetrano nell'atmosfera terrestre dopo aver viaggiato nello spazio per miliardi di anni a velocità prossime a quella della luce? Un affascinante legame tra le due domande è fornito dalle meteoriti, campioni della materia primordiale del sistema solare. Questi campioni primordiali sono stati successivamente bombardati da raggi cosmici nello spazio interplanetario per lunghi periodi di tempo. Lo studio degli effetti di tale bombardamento ha fruttato una quantità di informazioni non solo sulla radiazione cosmica, ma anche sulle meteoriti.

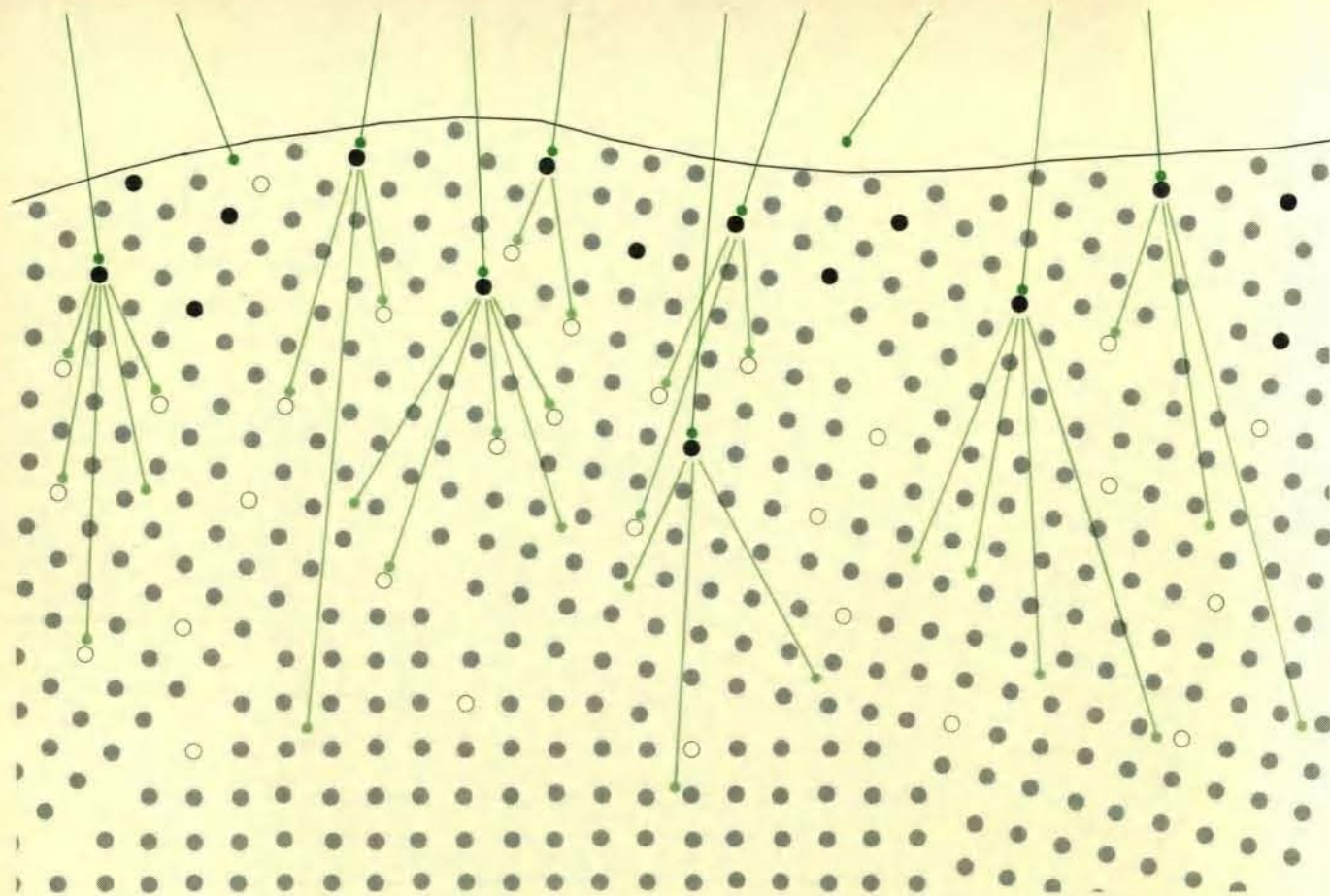
Le meteoriti sono corpi abbastanza solidi per poter sopravvivere nel viaggio dallo spazio interplanetario attraverso l'atmosfera terrestre fino alla superficie della Terra. Prima di raggiungere la Terra hanno circolato nello spazio interplanetario per periodi che vanno da qualche decina di migliaia di anni fino a due miliardi di anni. Fino a quando gli astronauti degli Apollo non hanno riportato campioni lunari, le meteoriti rappresentavano l'unico materiale extraterrestre a disposizione per un esame accurato. I processi geologici che complicano l'interpretazione della storia delle rocce sulla crosta terrestre non si applicano alle meteoriti, la cui composizione è rimasta essenzialmente invariata dal momento della formazione del sistema solare circa 4,5 miliardi di anni fa.

Per lo studioso di meteoriti il problema di base è dedurre la loro storia da una sconcertante abbondanza di prove. L'ampiezza del problema è indicata dalla varietà di tipi di meteoriti. Le due classi principali sono le meteoriti pietrose (o aeroliti) e le meteoriti ferrose (o sideritiche). Le meteoriti pietrose consistono principalmente di silicati con tracce di nichel e di ferro. Le meteoriti ferrose sono composte soprattutto di nichel e ferro in proporzioni diverse. Una classe più piccola è quella delle meteoriti ferro-pietrose (o sideroliti) che hanno una composizione intermedia tra le due precedenti. Le meteoriti pietrose si dividono a loro volta in due gruppi: le condriti e le acondriti secondo che contengano o meno globuli condritici, aggregati sferici di silicati di ferro-magnesio. Entro ciascun gruppo ci sono ulteriori suddivisioni basate sulla composizione mineralogica e chimica.

I primi tentativi di spiegare le origini delle meteoriti erano necessariamente basati sulle loro proprietà strutturali e chimiche. Il grado con cui i tipi di meteoriti si differenziano chimicamente suggerisce che esse si siano formate all'interno di corpi genitori abbastanza grandi da far sí che il calore generato dal decadimento degli elementi radioattivi fondesse il ferro e lo facesse precipitare nel nucleo del corpo. Il materiale delle meteoriti pietrose sarebbe salito verso la superficie del corpo dove la varietà delle condizioni di temperatura e di pressione avrebbe prodotto le varietà osservate di struttura e di composizione. Siccome le meteoriti che cadono sulla Terra hanno una massa variabile da pochi grammi a 50 tonnellate, dobbiamo ammettere che vi siano state una o più collisioni catastrofiche tra i corpi genitori con produzione di frammenti che circolano nello spazio per lunghi periodi prima di essere catturati da corpi maggiori come la Terra.

Si può stimare il raggio di un tipico corpo genitore dal tasso con cui si raffredda dalla sua condizione primitiva di corpo fuso. Si può dedurre questo tasso dalla precisa struttura metallurgica del ferro-nichel nelle meteoriti ferrose (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Sembra che il tasso di raffreddamento nella regione centrale dei corpi genitori quando solidificano sia compreso tra 1 e 10 gradi Celsius per milione di anni e questi tassi corrispondono a loro volta a corpi genitori con raggi variabili tra 50 e 200 chilometri.

Vi sono molte ipotesi riguardo alla sorgente di calore che dà origine alle elevate temperature iniziali dei corpi genitori. Si può scartare subito la conversione di energia gravitazionale, che è la sorgente fondamentale di calore nei primi stadi della storia di un corpo massiccio come una stella, poiché è del tutto inadeguata a scaldare fino alla temperatura di fusione un corpo il cui raggio è solo di poche centinaia di chilometri. Anche il decadimento degli elementi naturalmente radioattivi che si trovano oggi sulla Terra è troppo lento sia per fornire la quantità di calore richiesta sia per permettere il tasso osservato di raffreddamento. L'uranio-238, per esempio, ha un periodo di dimezzamento di 4,5 miliardi di anni. Si deve perciò concludere che la

Una sezione della meteorite di Tazewell fotografata con un ingrandimento di 45 diametri durante una ricerca di Joseph I. Goldstein della Lehigh University e di Harvey Yakowitz del National Bureau of Standards. Le regolari figure lineari, note come figure di Widmanstätten, sono caratteristiche delle meteoriti ferrose. I dettagli della figura dipendono dalla composizione chimica della materia e dal tasso a cui si è raffreddata. Esse contengono informazioni sulle probabili dimensioni del corpo genitore all'interno del quale si sarebbe formato inizialmente il materiale meteoritico.

La spallazione avviene quando in una meteorite una particella veloce della radiazione cosmica primaria (*in colore scuro*) urta il nucleo di un atomo di ferro (*in grigio*). Il nucleo emette un fiotto di neutroni e di protoni; il nucleo residuo (*in nero*) si chiama prodotto di spallazione. Il fiotto di neutroni e di protoni forma un flusso di particelle secondarie di raggi cosmici (*in colore chiaro*). Queste particelle di energia inferiore urtano altri nuclei piú profondi entro la meteorite dando origine ad altri prodotti di spallazione (*cerchi aperti*). Misurando le concentrazioni dei vari prodotti delle reazioni di spallazione che si trovano entro la meteorite si può determinare per quanto tempo la meteorite stessa è stata esposta alla radiazione cosmica.

sorgente di calore capace di fondere i corpi genitori delle meteoriti fu qualche elemento radioattivo, ora estinto, che si era sintetizzato nei processi nucleari originari che portarono alla materia da cui si è formato il sistema solare. Un tale elemento deve aver avuto un tempo di dimezzamento cosí breve che oggi non se ne trova piú traccia. Il candidato piú probabile è l'alluminio-26 che ha un periodo di dimezzamento di 740 000 anni. Dal fatto che il tempo durante il quale tale elemento radioattivo di breve vita può essere esistito in quantità sufficiente per produrre una sorgente di calore utile è stato relativamente breve, si può concludere che i processi di condensazione che formarono i corpi genitori delle meteoriti devono essere iniziati in un periodo relativamente breve (meno di 10 milioni di anni) dopo la fine della sintesi nucleare che ha creato gli elementi del sistema solare.

Quanto tempo fa avvennero i processi di condensazione? Per rispondere a questa domanda possiamo usare le stesse tecniche di datazione che sono state largamente applicate alla determinazione dell'età delle rocce terrestri. La piú semplice in linea di principio, e la prima a essere stata applicata alle meteoriti, è il metodo dell'uranio-torio. I due isotopi dell'uranio in natura, l'uranio-235 e l'uranio-238, decadono successivamente in altri elementi radioattivi fino a diventare alla fine isotopi non radioattivi del piombo. Sia per l'uranio-235 sia per l'uranio-238 molti decadimenti comportano l'emissione di particelle alfa che sono nuclei di elio. Il decadimento dell'uranio originario conduce perciò alla formazione di elio (se il materiale è sufficientemente freddo da non disperdere il gas).

All'inizio, quando si formarono i corpi genitori delle meteoriti, la loro temperatura era cosí alta che l'elio subí un processo di diffusione andando perduto. Proseguendo il raffreddamento il corpo genitore raggiunse una temperatura al di sotto della quale l'elio non poteva piú disperdersi per diffusione. La quantità di elio presente in una data meteorite sarà perciò funzione della concentrazione dell'uranio e del tempo che è trascorso dalla solidificazione del corpo genitore; la misura delle concentrazioni relative di elio e uranio ci permettono di stimare questo tempo.

Le misure fatte con questo metodo e altri metodi simili portano a concludere che i corpi genitori delle meteoriti furono creati 4,5 miliardi di anni fa. L'età effettiva delle meteoriti dedotta dalla conservazione dell'elio copre un intervallo assai ampio. Si può spiegare la maggior parte di questo effetto col fatto che la meteorite ha perso una parte dell'elio durante la sua storia successiva a causa sia di collisioni sia del riscaldamento durante un passaggio in prossimità del Sole. Tale perdita di elio dà naturalmente origine a un'età apparente inferiore a quella vera. D'altra parte molte delle prime misure di elio davano età molto alte, alcune delle quali notevolmente superiori all'età delle piú vecchie rocce terrestri note. Nel 1947 Carl A. Bauer dell'Harvard College Observatory ha dimostrato che i raggi cosmici energetici che bombardano le meteoriti producono notevoli quantità di elio. È stato questo elio « cosmogenico », oltre all'elio radiogenico prodotto dal decadimento dell'uranio, a produrre età erroneamente lunghe in alcune meteoriti.

La presenza di elio cosmogenico nelle meteoriti fu confermata da F. A. Paneth e dai suoi collaboratori dell'Università di Durham nel 1952. Da allora si è misurato un gran numero di elementi cosmogenici nelle meteoriti. L'interpretazione dei risultati ha condotto a interessanti conclusioni riguardo alla storia delle meteoriti dopo lo smembramento del corpo genitore. Per comprendere l'effetto dei raggi cosmici sulle meteoriti si devono ora considerare alcune proprietà della radiazione stessa.

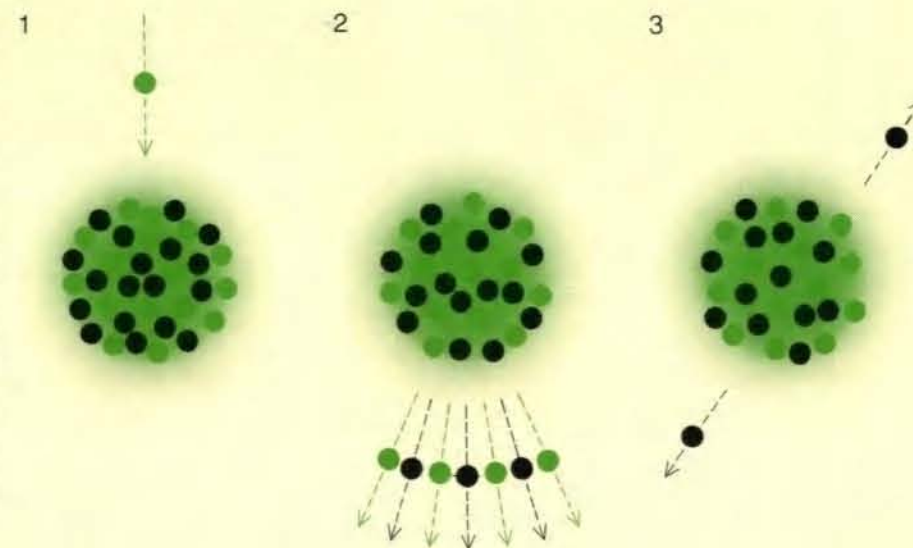
La radiazione cosmica primaria è costituita da particelle, soprattutto protoni, che hanno energie fino a valori enormi di 10^{20} elettronvolt. (Si pensi, per confronto, che l'energia delle particelle alfa o beta emesse nei normali decadimenti radioattivi sono dell'ordine di pochi milioni di elettronvolt). Oltre ai protoni, la radiazione contiene un numero minore di particelle piú pesanti, nuclei di elementi piú pesanti dell'idrogeno. L'abbondanza relativa di questi nuclei diminuisce notevolmente col crescere della massa.

Le enormi energie dei raggi cosmici sono un indizio della loro origine perché vogliono dire che la radiazione si genera in eventi cataclismici, come esplosioni di supernove, che liberano quantità enormi di energia sia nella nostra sia in altre galassie. Il vivo interesse per questi fenomeni ha condotto a uno sforzo maggiore per misurare le proprietà della radiazione cosmica. Lo studio dell'effetto dei raggi cosmici sulle meteoriti può perciò portare un notevole contributo in diversi campi.

Quando una particella veloce dei raggi cosmici urta in una meteorite il nucleo di un atomo vengono espulsi molti neutroni e protoni e alcuni mesoni pi-greco che rappresentano le forze di attrazione che tengono unito il nucleo. L'energia restante della particella bombardante viene distribuita tra i protoni e i neutroni lasciati nel nucleo. Una o piú di queste particelle possono poi « evaporare » fuori dal nucleo. Il risultato finale è che il nucleo urtato si trasforma in un nucleo di un elemento diverso che può essere radioattivo o stabile. Questo processo si chiama spallazione e il nucleo residuo si chiama prodotto di spallazione. Una meteorite che è stata esposta alla radiazione cosmica durante il suo moto nello spazio conterrà piccole quantità di vari elementi radioattivi che si possono identificare grazie al tempo di dimezzamento e alla radiazione caratteristica che emettono.

Le particelle primarie della radiazione cosmica possono penetrare la materia solo per profondità relativamente piccole. Perciò la materia nell'interno dei corpi genitori è completamente schermata dalla radiazione e ne è contaminato solo un sottile strato superficiale che rappresenta una frazione trascurabile del volume totale. Però dall'istante in cui due corpi genitori collidono, le meteoriti nei residui della collisione sono esposte alla radiazione cosmica e in essi cominciano a formarsi i prodotti di spallazione. Il processo continua finché la meteorite cade sulla Terra e l'atmosfera terrestre la protegge dalla radiazione cosmica. Il lasso di tempo tra l'inizio dell'esposizione della meteorite alla radiazione cosmica e il momento in cui viene catturata dalla Terra è noto come periodo di esposizione.

I periodi medi di esposizione vanno da alcune decine di migliaia di anni a due miliardi di anni. Il modo piú ovvio per arrivare al periodo di esposizione è semplicemente quello di misurare la concentrazione di alcuni prodotti di spallazione stabili e di dividere questo valore per il tasso a cui si produce quel nucleo. Tale procedimento è però piú complicato di quel che sembra. È difficile calcolare il tasso di produzione di un dato prodotto di spallazione perché il tasso dipende, tra le altre cose, dalla composizione della singola meteorite, dalla differenza di massa tra il nucleo originale e il nucleo del prodotto di spallazione, e dall'intensità e dalla distribuzione di energia delle particelle bombardanti. L'energia e l'intensità della radiazione dipendono a loro volta dall'orbita della meteorite e dalla profondità a cui la radiazione penetra nell'oggetto. Anche quando in laboratorio si bombardano con protoni dei campioni di meteoriti negli acceleratori per standardizzare i calcoli, rimane una apprezzabile incertezza nella previsione del tasso a cui si formano i prodotti di spallazione.

Si possono evitare varie difficoltà relative al calcolo dei tassi assoluti di produzione confrontando la concentrazione di due diversi prodotti di spallazione di massa approssimativamente uguale. Il rapporto dei tassi di produzione di questi due nuclei si può stimare con precisione molto maggiore dei tassi individuali perché molte incertezze si cancellano tra loro. Se uno dei nuclei scelti è radioattivo, la concentrazione di questo elemento raggiungerà alla fine un livello costante per cui il tasso di produzione è esattamente compensato dal tasso con cui decade radioattivamente. Se il tempo di dimezzamento del nucleo è breve, questa condizione di equilibrio si raggiunge abbastanza presto dopo l'inizio dell'irraggiamento. Se l'altro prodotto è stabile la sua concentrazione crescerà costantemente in funzione del tempo di irradiazione. Il rapporto delle concentrazioni dei due prodotti di spallazione sarà perciò una misura diretta del periodo di esposizione.

Una tipica reazione di spallazione comporta un protone di raggio cosmico ad alta energia che urta un nucleo di zolfo-34 (*1*) costituito di 16 protoni (*in colore*) e 18 neutroni (*in nero*). Quando il protone del raggio cosmico urta il nucleo, espelle un fiotto di quattro protoni e tre neutroni (*2*). Il nucleo restante viene lasciato in condizioni di eccitazione. Alla fine si libera dell'energia di eccitazione in eccesso emettendo due altri neutroni (*3*). Il prodotto finale di spallazione è un nucleo radioattivo di alluminio-26 il quale presenta un periodo di dimezzamento di circa 740 000 anni.

Si sono fatte molte misure del tempo di esposizione con lo spettrometro di massa che può misurare le esigue quantità di gas rari prodotte per spallazione. Un'altra tecnica fa ricorso alla spettrometria a coincidenza gamma: un campione di meteorite viene posto tra due rivelatori ciascuno dei quali produce un impulso elettrico quando viene colpito da un raggio gamma emesso dal campione. Tale sistema è particolarmente adatto alla misura di un isotopo radioattivo che decade emettendo un positone (elettrone positivo). Il positone rallenta rapidamente il suo moto e incontra un elettrone negativo; le particelle si annichilano tra loro dando origine a due raggi gamma che emergono in direzioni opposte. Per un piccolo campione posto simmetricamente tra i due rivelatori vi è una probabilità abbastanza alta che uno dei raggi gamma sia rivelato nel primo rivelatore mentre l'altro lo è nel secondo. I rivelatori sono connessi a un analizzatore a coincidenza che emetterà un impulso in uscita solo quando riceve due impulsi in entrata dell'intensità adeguata entro un brevissimo intervallo di tempo. La probabilità che si verifichi un analogo evento quando i due rivelatori registrano simultaneamente due raggi gamma non correlati, ma dovuti a impurità radioattive, è bassissima. Ne segue che questo sistema è altamente selettivo per la radiazione emessa da un campione di meteorite. La spettrometria a coincidenza gamma presenta inoltre il vantaggio di non distruggere il campione.

Alcuni gruppi, come quello diretto da Edward Anders dell'Università di Chicago, hanno misurato la concentrazione di isotopi radioattivi in un gran numero di meteoriti. Grazie a tali misure si può analizzare la distribuzione dei tempi di esposizione con un numero statisticamente significativo di osservazioni; l'analisi ci fornisce indicazioni interessanti sull'origine delle diverse classi di meteoriti. La distribuzione dei periodi misurata da H. Voshage del Max Planck Institute for Chemistry su circa 60 meteoriti mostra un effetto di « ammasso » e ciò suggerisce che la maggior parte di esse si sia originata in tre o quattro collisioni principali di corpi genitori in determinate epoche durante l'ultimo miliardo di anni (*si veda la figura a pag. 40 in alto*). James R. Arnold, dell'Università della California a San Diego, e altri, lavorando con modelli del sistema solare elaborati al calcolatore, hanno dimostrato che tempi di esposizione dell'ordine di quelli osservati per le meteoriti ferrose sono in accordo con gli intervalli previsti perché meteoriti prodotte per collisione siano catturate in un incontro casuale sulla Terra. In questi modelli si ammette che i corpi genitori abbiano subito una collisione entro la fascia dei pianetini che si trovano tra Marte e Giove.

I periodi di esposizione delle meteoriti pietrose sono però di uno o due ordini di grandezza inferiori a quelli delle meteoriti ferrose. Sono state proposte molte ipotesi geniali per tentare di spiegare tale differenza. Una possibilità è che il numero delle meteoriti pietrose nella fascia dei pianetini sia abbastanza alto per cui le meteoriti che non incontrano la Terra in un tempo relativamente breve dopo la loro formazione sono distrutte per collisione con altre meteoriti. Questo meccanismo limiterebbe la vita delle meteoriti e diminuirebbe la distribuzione delle età osservate sulla Terra. L'aspetto negativo di questa ipotesi è che la densità richiesta per i resti nella fascia dei pianetini risulta troppo alta.

Harold C. Urey dell'Università della California a San Diego ha avanzato l'ipotesi che alcune meteoriti pietrose condritiche possano essere parte dei resti espulsi dalla superficie lunare in seguito a collisioni meteoritiche. Vi sono varie obiezioni a questa ipotesi e tra queste il fatto che i campioni raccolti dalle spedizioni Apollo hanno ora dimostrato che il materiale lunare ha una composizione molto diversa da quella delle meteoriti condritiche.

Nel 1959 Fred L. Whipple ed Edward L. Fireman dell'Harvard College Observatory hanno proposto un'altra spiegazione per l'assenza di meteoriti pietrose con lungo tempo di esposizione. La meteorite durante il tempo trascorso nello spazio è stata continuamente erosa dalla polvere e dal gas interplanetari. Whipple e Fireman conclusero che le meteoriti pietrose si erodono molto piú velocemente di quelle ferrose. Ne segue che le meteoriti pietrose che non sono state catturate dalla Terra entro un certo periodo vengono completamente distrutte dall'erosione, mentre le meteoriti ferrose sono piú resistenti.

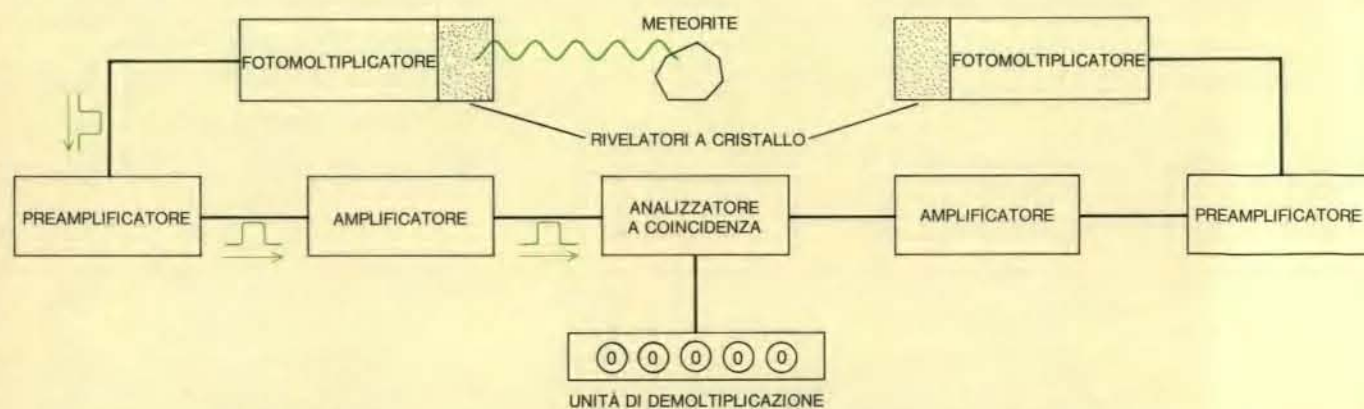
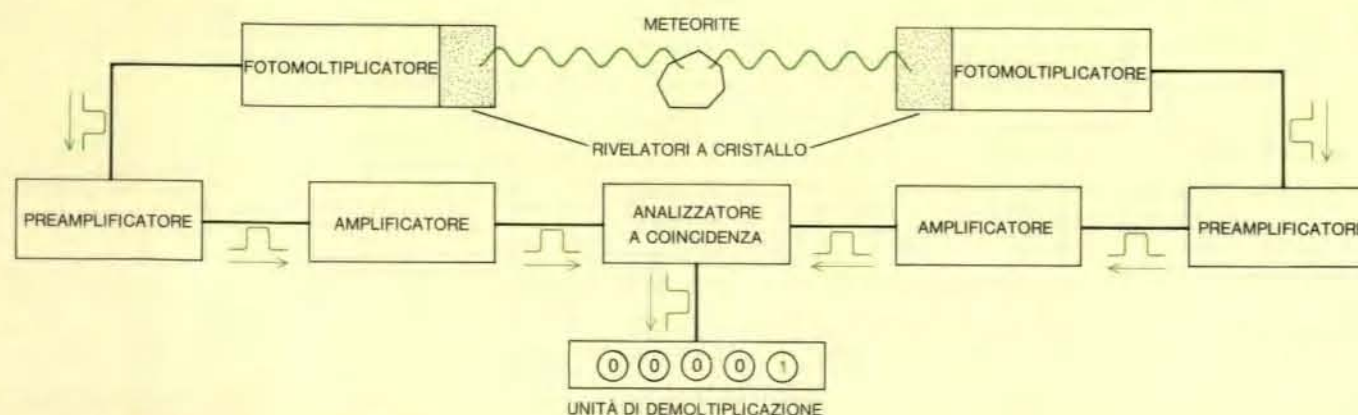
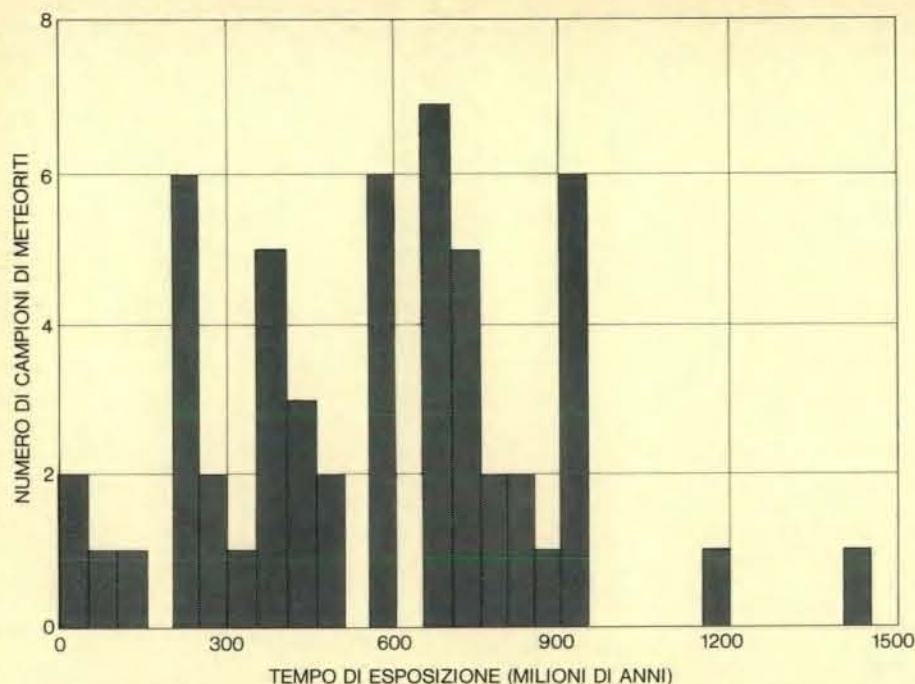
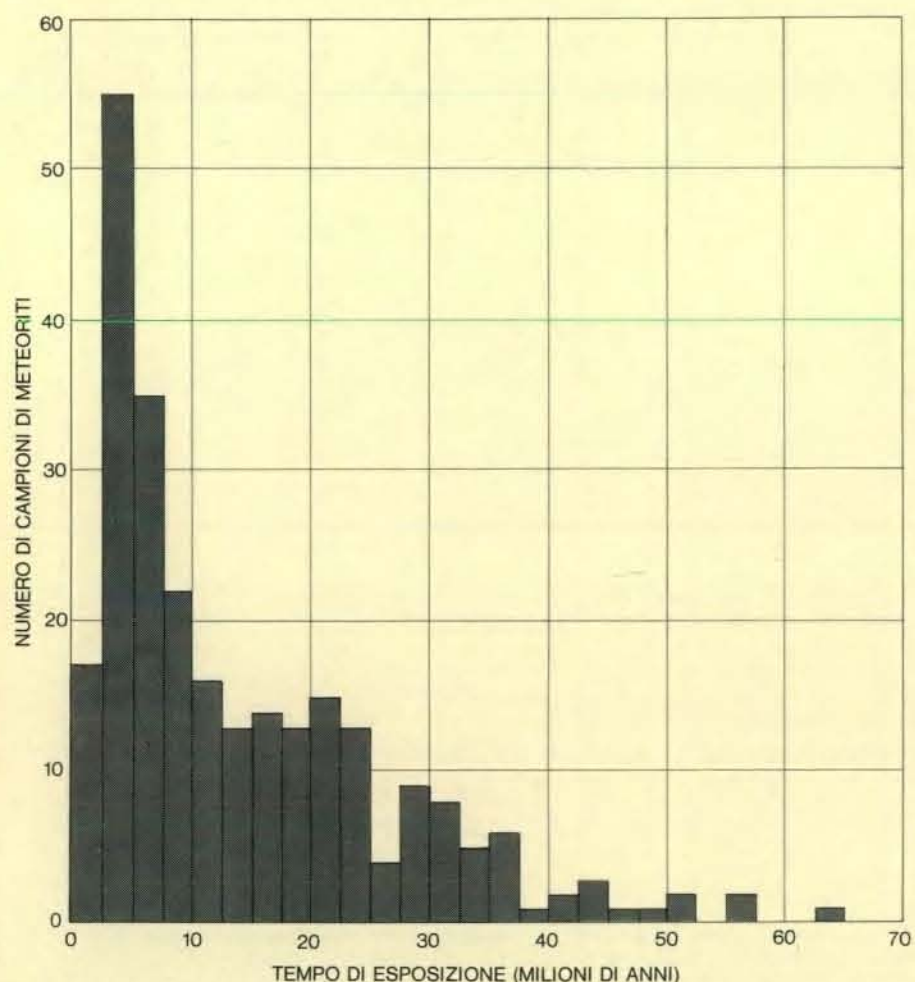
È teoricamente possibile rivelare l'esistenza di una tale erosione nello spazio confrontando le varie stime del tempo di esposizione di una singola meteorite sulla base dei rapporti misurati di isotopi radioattivi con tempi di dimezzamento notevolmente diversi. Per un isotopo con un tempo di dimezzamento breve, gli atomi radioattivi, presenti nel momento in cui la meteorite è caduta sulla Terra, sarebbero stati creati dai raggi cosmici che l'hanno bombardata nel periodo relativamente breve verso la fine della sua esposizione dato che gli atomi creati in precedenza sarebbero tutti decaduti. Per un prodotto di spallazione stabile, o per uno con un tempo di dimezzamento lungo, invece, gli atomi radioattivi presenti si sarebbero formati essenzialmente durante tutto il tempo di esposizione della meteorite. Se ammettiamo che vi sia una notevole entità di erosione nello spazio, molti atomi stabili o di lunga vita presenti si sarebbero prodotti quando la meteorite era molto piú grande e non subito prima della sua caduta sulla Terra. Il tasso di produzione cosmica nel suo interno sarebbe perciò relativamente basso a causa dell'efficace effetto di schermo al bombardamento di raggi cosmici rappresentato dal grande volume della meteorite. Ne risulta che la concentrazione misurata di un isotopo a vita lunga sarebbe inferiore, rispetto a quella di un isotopo a vita breve, a quella che si sarebbe avuta se il raggio della meteorite non fosse diminuito durante il tempo di esposizione, cioè se non vi fosse stata erosione nello spazio.

Per il momento le prove di una quantità significativa di erosione nello spazio non sembrano conclusive. David E. Fisher dell'Università di Miami ha dimostrato che un tasso di erosione di 0,2 millimetri per milione di anni è sufficiente a spiegare le differenze nella stima dei tempi di esposizione delle meteoriti ferrose. D'altra parte le età osservate per le meteoriti pietrose richiedono un tasso di erosione all'incirca 50 volte maggiore: dell'ordine di un centimetro per milione di anni. Un tasso di erosione nello spazio di questa entità implica che molte meteoriti pietrose siano state, durante la prima parte dell'esposizione, abbastanza grandi da essere sottoposte nel loro interno a un flusso relativamente alto di neutroni che si formano in quantità apprezzabile come prodotti secondari del bombardamento di raggi cosmici entro le meteoriti di grandi dimensioni. La formazione di neutroni porterebbe a sua volta alla produzione di concentrazioni di isotopi come l'argo-38 (che si forma per cattura di neutroni) maggiori di quelle osservate. Inoltre la prova delle tracce di particelle di raggi cosmici nelle meteoriti ha fatto sorgere il dubbio sull'esistenza dell'effetto di erosione spaziale dell'entità accettata da alcuni.

Uno dei fattori che complicano la determinazione dei tempi di esposizione è che il tasso a cui si formano i vari prodotti di spallazione dipende dalla loro profondità sotto la superficie della meteorite. Ciò deve sempre essere tenuto presente quando si confrontano i tempi di esposizione ottenuti con misure indipendenti su frammenti diversi di una data meteorite. Per creare prodotti di spallazione di massa notevolmente diversa dalla massa del nucleo originale, le particelle bombardanti devono essere altamente energetiche. I prodotti di spallazione di questo tipo tendono perciò a concentrarsi nelle regioni esterne della meteorite che sono sottoposte a bombardamento diretto da parte di particelle primarie di alta energia della radiazione cosmica. Il flusso di particelle primarie di alta energia diminuisce rapidamente con la profondità dato che le particelle dissipano la loro energia generando un flusso di particelle secondarie di energia inferiore. Le particelle secondarie sono ancora capaci di produrre spallazione, ma possono formare soltanto prodotti la cui massa non sia molto diversa da quella del nucleo originale. Il flusso di particelle secondarie cresce in un primo tempo con la profondità e il tasso con cui crea prodotti di spallazione raggiunge il massimo a profondità tra 10 e 20 centimetri sotto la superficie della meteorite. Perciò il tasso di produzione diminuisce gradualmente con la profondità via via che si dissipa l'energia delle particelle secondarie.

La concentrazione relativamente bassa nella regione superficiale dei prodotti di spallazione creati dal flusso secondario di bassa energia è controbilanciata in parte dai raggi cosmici di bassa energia emessi dal Sole che rinforzano la produzione di questi prodotti. Entrambi gli effetti sono difficili da misurare con precisione dato che una notevole quantità del materiale superficiale della meteorite viene perso per riscaldamento quando essa attraversa ad alta velocità l'atmosfera terrestre: questo processo è noto come ablazione. Misurando la concentrazione di un dato isotopo radioattivo e determinando le linee di uguale concentrazione è possibile ricostruire la forma originale che la meteorite aveva prima di entrare nell'atmosfera e avere cosí informazioni sull'entità dell'ablazione.

Finora abbiamo discusso come si possono interpretare le misure di effetti cosmogenici per ottenere informazioni sulle meteoriti e sulla storia del sistema solare. Si possono utilizzare queste stesse misure per studiare le possibili variazioni dell'intensità delle particelle stesse dei raggi cosmici riguardo sia a un'epoca nel passato sia alla posizione della meteorite nel sistema solare. Per esempio, si sa che l'intensità del flusso di raggi cosmici che arriva sulla Terra varia lungo un ciclo di 11 anni e ciò a causa del ciclo di attività magnetica del Sole. Il campo magnetico solare devia le particelle cariche e quindi il minimo dell'intensità dei raggi cosmici coincide col massimo dell'attività solare.

Il flusso a cui è esposta una meteorite nel suo moto orbitale varierà con lo stesso periodo di 11 anni. La concentrazione di un isotopo radioattivo cosmogenico con un tempo di dimez-

La spettrometria a coincidenza gamma è particolarmente adatta alla misura di un isotopo che decade con la emissione di un positone (elettrone positivo). Quando un positone incontra un elettrone negativo, le particelle si annichilano tra loro dando origine a due raggi gamma che emergono in direzioni opposte. Per un campione posto tra due rivelatori c'è un'alta probabilità che uno dei raggi sia rivelato nel primo rivelatore proprio quando l'altro è rivelato nel secondo. L'interazione di un raggio gamma con uno dei cristalli produce un lampo di luce che viene amplificato dal fotomoltiplicatore collegato al cristallo per produrre un impulso elettrico. Gli impulsi attraversano il circuito in direzione di un analizzatore a coincidenza che produce un impulso in uscita solo quando riceve due impulsi in entrata in un brevissimo intervallo di tempo. Se viene rivelato un raggio gamma casuale (*a sinistra*), l'analizzatore a coincidenza non permette all'impulso di passare e non viene registrato nessun conteggio sull'unità di scala. Se invece sono rivelati due raggi gamma (*a destra*) l'analizzatore a coincidenza emette un impulso e l'unità di demoltiplicazione lo rivela come evento di decadimento del campione meteoritico.

I tempi di esposizione delle meteoriti ferrose, cioè il periodo di tempo durante cui le meteoriti sono state esposte alla radiazione cosmica, tendono a concentrarsi intorno a certi valori. Si fa l'ipotesi che questi valori corrispondano alle varie collisioni maggiori tra i grandi corpi genitori nel sistema solare. I resti di queste collisioni sono le meteoriti. Il diagramma si basa sul lavoro di H. Voshage del Max Planck Institute.

I tempi di esposizione delle meteoriti pietrose mostrano una distribuzione più continua di quelli delle meteoriti ferrose. Inoltre le età sono molto più basse. Una possibile spiegazione è che le più vecchie siano state distrutte per « erosione nello spazio ».

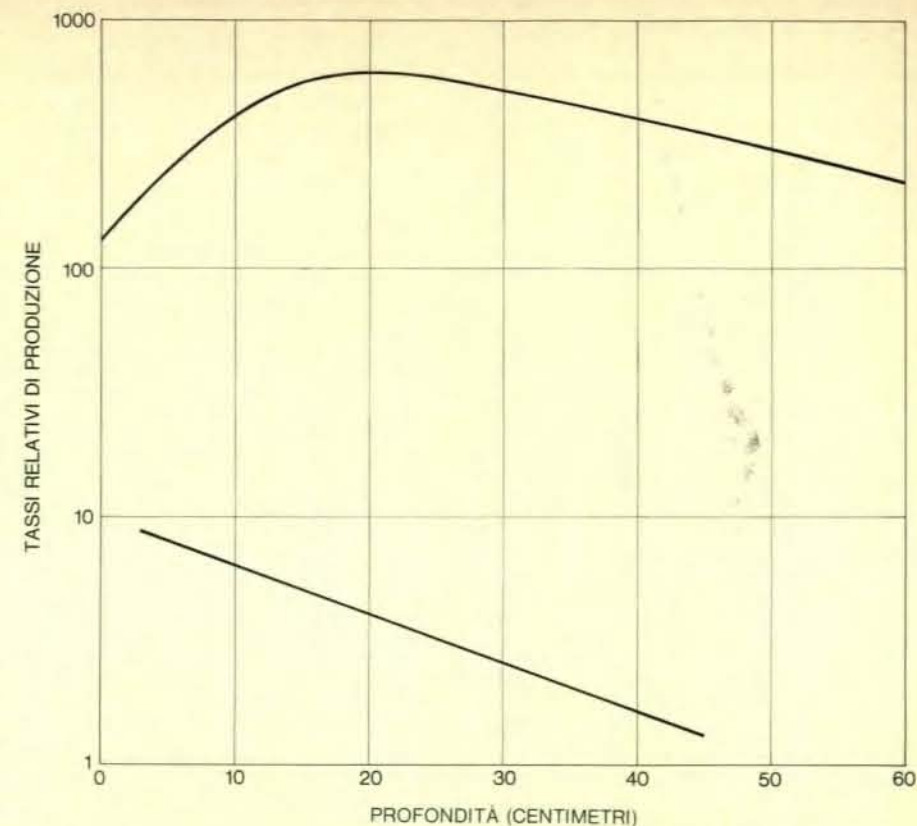
zamento lungo (come l'alluminio-26 che ha un tempo di dimezzamento di 740 000 anni) non risentirà in pratica del ciclo di 11 anni. Gli atomi presenti in qualsiasi particolare momento si saranno prodotti per l'esposizione della meteorite al flusso di raggi cosmici integrato su un periodo di vari milioni di anni. D'altra parte la normale concentrazione di un prodotto con un tempo di dimezzamento breve (come il sodio-22 il cui tempo di dimezzamento è di 2,6 anni) sarà fortemente influenzata dal flusso a cui è stata sottoposta negli ultimi due o tre anni dal momento che il sodio-22 formatosi molto prima sarà già decaduto.

Fireman prese in esame un certo numero di meteoriti e confrontò i rapporti della concentrazione di sodio-22 rispetto all'alluminio-26 misurati all'epoca della loro caduta coi valori teorici previsti sulla base dell'ampiezza nota della variazione undecennale del flusso di raggi cosmici alla distanza della Terra dal Sole. Trovò che la variazione misurata del rapporto dei due elementi era inferiore alla variazione prevista. Tale risultato indica che l'ampiezza di tale variazione è più piccola nella posizione delle orbite delle meteoriti (che si trovano generalmente a distanza doppia della Terra dal Sole) piuttosto che nella posizione dell'orbita terrestre.

La conoscenza dei rapporti degli isotopi cosmogenici di vita breve e lunga nelle meteoriti è naturalmente molto più utile se si conosce bene l'orbita della meteorite. Negli ultimi anni sono entrate in funzione reti di stazioni per registrare fotograficamente le tracce delle meteoriti in modo da poter stimare con precisione le loro traiettorie. Finora si sono misurate con questo metodo solo due traiettorie. La più recente fu la traiettoria della meteorite di Lost City che cadde nell'Oklahoma il 3 gennaio 1970. Grazie alle osservazioni fotografiche la meteorite fu rinvenuta rapidamente, e vari studiosi poterono misurare la concentrazione di un discreto numero di radioisotopi cosmogenici aventi tempi di dimezzamento largamente differenti.

Fireman e i suoi collaboratori hanno determinato il rapporto di due isotopi radioattivi cosmogenici, l'argo-37 e l'argo-39 che vengono prodotti con processi assai simili nella spallazione di nuclei di ferro. Il tempo di dimezzamento dell'argo-39 è di 270 anni, quello dell'argo-37 di 35 giorni; perciò la concentrazione di argo-39 dava un indice dell'intensità media dei raggi cosmici sul raggio medio dell'orbita della meteorite, mentre la concentrazione di argo-37 si riferiva all'intensità dei raggi cosmici relativa all'ultimo o agli ultimi due mesi quando la meteorite si trovava in prossimità dell'orbita terrestre. Il rapporto misurato per i due isotopi dell'argo era molto diverso da quello previsto nell'ipotesi che l'intensità dei raggi cosmici fosse stata la stessa in entrambe le posizioni. Risultò chiaro infatti che l'intensità della radiazione cosmica relativa al valor medio del raggio dell'orbita della meteorite era notevolmente maggiore di quella dell'orbita terrestre. Questo risultato è particolarmente utile perché varie sonde spaziali recanti strumenti a bordo, come il Mariner 4, che hanno misurato direttamente il gradiente di intensità dei raggi cosmici nello spazio, hanno dato risultati discordanti.

Le misure della radioattività indotta dai raggi cosmici sono state recentemente completate da una importante nuova tecnica che può essere applicata a una grande varietà di problemi che vanno dalla datazione di resti archeologici alle ricerche sull'estensione del fondo del mare. Si tratta della tecnica di rivelare le tracce lasciate nei solidi da veloci particelle subatomiche (si veda l'articolo *Tracce nucleari nei solidi* di R. L. Fleischer, P.B. Price e R.M. Walker, in « Le Scienze », n.13, settembre 1969). Una particella fortemente carica, per esempio uno dei nuclei più pesanti della radiazione cosmica, lascia una traccia più o meno permanente del danno provocato dalla ionizzazione lungo il suo percorso quando attraversa un materiale dielettrico (elettricamente isolante), e la regione vicino al percorso rimane in condizioni di alta reattività chimica. Un cristallo di minerale in una meteorite che sia stato esposto per lunghi periodi alla radiazione cosmica conterrà perciò un « ricordo » fossile del danno lasciato da particelle più pesanti. Fleischer, Price e Walker hanno dimostrato che se il cristallo è immerso in un opportuno agente chimico come l'acido fluoridrico, l'agente intaccherà il cristallo di preferenza lungo le tracce lasciate dalle particelle formando tracce osservabili al microscopio.

Una particella relativamente leggera come un protone non provoca un danno di ionizzazione sufficiente a produrre tracce intaccabili nei minerali naturali. Ne segue che si possono rivelare in questo modo solo i nuclei massicci, che costituiscono solo una minima frazione della radiazione cosmica. Questo fatto rende il metodo ideale per studiare la componente pesante della radiazione cosmica, dato che la maggior parte degli altri metodi risentono

Il tasso di formazione dei prodotti di spallazione dipende dalla profondità a cui penetrano i raggi cosmici. Il sodio-22 viene prodotto dal ferro solo da parte di raggi cosmici altamente energetici; la sua produzione diminuisce rapidamente con la profondità sotto la superficie della meteorite (*curva in basso*), al diminuire del flusso di particelle primarie della radiazione cosmica. La cascata di particelle secondarie di energia inferiore raggiunge un massimo tra 10 e 20 centimetri sotto la superficie. Il tasso di produzione del manganese-54 (*curva in alto*), un prodotto di spallazione di particelle secondarie, raggiunge un massimo a 20 centimetri sotto la superficie, quindi diminuisce quando risulta assorbito il flusso delle particelle di energia inferiore.

della interferenza di fondo delle componenti più leggere che sono assai più numerose.

L'analisi delle tracce trovate nelle meteoriti richiede una cura particolare perché si devono distinguere le tracce del passaggio delle particelle di raggi cosmici dalle tracce che provengono da altre fonti. I cristalli di meteorite che contengono uranio, per esempio, presentano tracce della fissione spontanea dell'uranio-238. In questi casi due frammenti del nucleo fissionato rinculano in direzioni opposte e producono il danno di ionizzazione. Fleischer, Price, Walker e i loro collaboratori nello studio delle tracce di fissione trovarono che il numero delle tracce di fissione spontanea era molto maggiore di quello spiegabile con la concentrazione di uranio-238 nel campione e avanzarono l'ipotesi che le tracce in più fossero state prodotte da un isotopo radioattivo estinto: il plutonio-244. Questo isotopo, come i membri più familiari delle serie dell'uranio e del torio, sarebbe stato prodotto nei processi nucleari che originarono la materia del sistema solare. A causa del breve tempo di dimezzamento esisterebbe ora in quantità irrilevabili.

Ci sono ancora altre fonti di tracce. Sebbene le particelle leggere della radiazione cosmica non siano per se stesse abbastanza massicce da lasciare tracce intaccabili, possono però collidere coi nuclei della meteorite e causare sia spallazione che fissione. Entrambi questi eventi possono produrre rinculo di nuclei abbastanza massicci che possono lasciare una traccia rivelabile.

Tutti questi tipi di tracce presentano certe caratteristiche che le rendono distinguibili dalle tracce autentiche della radiazione cosmica. Le tracce della radiazione cosmica primaria, per esempio, differiscono da quelle dovute alla fissione spontanea per il fatto che la loro densità è indipendente dalla concentrazione locale di uranio nel campione in oggetto. Inoltre il numero di tracce della radiazione cosmica diminuisce rapidamente con la profondità sotto la superficie delle meteoriti. Questo fatto può essere utilizzato, assieme alle linee di isoconcentrazione degli isotopi radioattivi, per ricostruire la for-

ma della superficie della meteorite prima di entrare nell'atmosfera terrestre e perciò offrire informazioni sull'entità dell'ablazione subita dalla meteorite.

La densità delle tracce nella regione superficiale della meteorite può essere usata anche per stimare la quantità di erosione spaziale. Se il tasso di erosione è alto, la densità delle tracce vicino alla superficie della meteorite caduta sarà basso perché durante la prima parte della storia della meteorite la regione sotto la superficie sarà stata protetta da una considerevole quantità di materia erosa successivamente. Price e i suoi collaboratori esaminarono la densità delle tracce nella regione superficiale della meteorite di Patwar. Giunsero al risultato che vi è un limite superiore al tasso di erosione nello spazio di circa un millimetro per milione di anni. Questo tasso è molto inferiore a quello che era stato suggerito come necessario per spiegare le discordanze nelle diverse stime di tempo di esposizione di meteoriti pietrose determinate mediante isotopi radioattivi cosmogenici di diversi tempi di dimezzamento.

Un'altra caratteristica delle tracce delle particelle è che il danno della ionizzazione tende a scomparire per un processo di tempera quando il minerale viene riscaldato sopra una certa temperatura rendendo cosí possibile stimare il tasso con cui si raffredda il corpo genitore della meteorite. La temperatura iniziale del corpo genitore è troppo alta per conservare le tracce potenziali prodotte entro di esso dalla fissione spontanea dell'uranio e del plutonio. Col raffreddarsi del corpo però, i vari cristalli minerali in esso contenuti scenderanno sotto le temperature critiche per cui il danno della radiazione è eliminato dall'effetto di tempera e ciascun minerale comincerà ad accumulare tracce permanenti. Ogni minerale è caratterizzato da una propria temperatura critica per mantenere le tracce e queste temperature si possono determinare in laboratorio. I minerali con temperature critiche maggiori presenteranno perciò una densità di tracce superiore rispetto alla concentrazione di uranio-238 entro la meteorite. Si può correlare la densità delle tracce con la concentrazione di uranio in cristalli di diversi minerali: è questo il procedimento che permette una stima del tasso a cui si raffredda il corpo genitore.

Fleischer concluse da un tale studio che il corpo genitore della meteorite nota come meteorite ferrosa di Toluca si raffreddò al ritmo di un grado Celsius per milione di anni. Questo ritmo corrisponde a un corpo col raggio di circa 200 chilometri. Apparve anche chiaro dai suoi risultati che la maggior parte delle tracce si sono formate dalla fissione spontanea del plutonio-244 piuttosto che dell'uranio-238. Il fatto stesso che una quantità relativamente grande di plutonio fosse ancora presente all'epoca della solidificazione del corpo genitore nonostante il breve tempo di dimezzamento, conferma l'ipotesi che l'intervallo di tempo trascorso tra la sintesi nucleare finale della materia del sistema solare e il tempo in cui si formarono i pianeti è stato molto piú breve del tempo totale di esistenza del sistema solare.

Una delle caratteristiche piú utili delle tracce di particelle è che la lunghezza della traccia prodotta da un nucleo di raggio cosmico ad alta energia che attraversa un cristallo minerale è funzione della carica trasportata dal nucleo. La distribuzione statistica della lunghezza delle tracce indica perciò direttamente le proporzioni di nuclei diversi presenti nella radiazione. Il lungo tempo di esposizione dei cristalli della meteorite non solo rende possibile un accumulo di tracce statisticamente significativo, ma fornisce anche l'opportunità di scoprire se vi sono state o meno apprezzabili variazioni nell'intensità delle varie componenti della radiazione cosmica durante il tempo di esposizione della meteorite. M. Maurette, e i suoi collaboratori dell'Università di Washington, dalla misura della densità delle tracce nella condrite di Saint Séverin conclusero che l'intensità della componente di particelle pesanti nella radiazione cosmica, mediata sul tempo di esposizione della meteorite di 12 milioni di anni, era essenzialmente la stessa dell'attuale.

Le orbite di due meteoriti, le cui traiettorie sono state osservate da una rete di stazioni per la registrazione fotografica, mostrano che le meteoriti hanno origine nella fascia dei pianetini tra Marte e Giove. La meteorite di Lost City è la piú recente e fu ricuperata abbastanza in fretta da permettere a vari studiosi di misurare i tempi di dimezzamento dei prodotti di spallazione.

Siccome la lunghezza della traccia nel solido dipende dalla carica elettrica della particella, si possono usare queste tracce per la ricerca di elementi « superpesanti » nella radiazione cosmica. Con l'eccezione del plutonio-244 recentemente scoperto, non è stato trovato in natura nessun nucleo di carica maggiore di quella dell'uranio, sebbene si possano produrre artificialmente elementi piú pesanti negli acceleratori di particelle o nei reattori nucleari. La ragione per cui non esistono in natura elementi transuranici è che al crescere del numero di protoni e neutroni nel nucleo, i protoni carichi positivamente si respingono tra loro con tanta forza che il nucleo diventa instabile e decade rapidamente o per fissione spontanea o per emissione di particelle alfa. Sovrapposta a questa tendenza generale all'instabilità esiste però la tendenza opposta verso una stabilità maggiore quando il numero dei protoni è prossimo a certi « numeri magici ». Questi numeri corrispondono alla chiusura completa dei gusci in cui sono disposte le particelle del nucleo. È stato proposto che possano esistere « isole di stabilità » per elementi con circa 110 protoni e si può prevedere che i tempi di dimezzamento per i nuclei in questa regione arrivino fino a 100 milioni di anni.

Peter H. Fowler e i suoi collaboratori dell'Università di Bristol trovarono la prima prova sperimentale che suggerisce la probabile esistenza di un nucleo superpesante nella radiazione cosmica. Scoprirono una traccia fortemente ionizzata su speciali lastre fotografiche poste su un pallone che aveva volato ad alta quota. La loro identificazione della traccia non fu però completamente conclusiva e diversi ricercatori hanno cercato da allora la prova definitiva di tracce lasciate da nuclei transuranici nelle meteoriti e nelle rocce lunari riportate dagli astronauti degli Apollo. Si sono trovate tracce particolarmente lunghe che potrebbero essere state prodotte da nuclei superpesanti. La ricerca è incessante perché la dimostrazione che esistono elementi superpesanti sarebbe di grande interesse per i fisici teorici nucleari e confermerebbe i loro metodi di previsione delle proprietà nucleari. Inoltre la presenza di nuclei di vita relativamente breve nella radiazione cosmica farebbe luce su come si diffondono le particelle di raggi cosmici nella Galassia e aiuterebbe a decidere in quale misura la radiazione si origina nella nostra galassia e in quale misura ci perviene da regioni piú lontane dell'universo.

Le tracce nucleari in un cristallo della meteorite di Fayetteville, che si rivelano come linee scure sottili e corte, si formarono da nuclei di ferro e di elementi piú pesanti. Furono fotografate con un ingrandimento di 60 000 diametri mediante un microscopio elettronico ad alta tensione da D. J. Barber e P. B. Price jr., dell'Università della California a Berkeley. Per rivelare simili tracce al microscopio lavorando alle lunghezze d'onda visibili, il cristallo deve essere intaccato con un reagente chimico come acido fluoridrico o soda caustica (idrossido di sodio) calda. Le tracce compaiono quando il cristallo è stato bombardato da radiazione cosmica dei brillamenti solari all'inizio della vita del sistema solare prima che il cristallo diventasse parte di una meteorite. Le due bande scure non sono tracce, ma caratteristiche cristallografiche.

Come abbiamo visto, una quantità di informazioni può essere racchiusa in pochi centimetri cubi di materia meteoritica. Negli ultimi anni queste informazioni sono state rinforzate in un modo piú eccitante dai risultati dello studio del materiale riportato dalla Luna. I campioni lunari hanno alcuni vantaggi sulle meteoriti. Per esempio è complesso interpretare le concentrazioni di isotopi radioattivi nelle meteoriti in termini di variazioni dell'intensità dei raggi cosmici per la difficoltà di distinguere tra effetti dello spazio ed effetti del tempo, dato che in generale è sconosciuta l'orbita delle meteoriti. L'incertezza spaziale è eliminata nel caso della Luna la cui orbita è conosciuta con grande precisione. Un altro vantaggio del materiale lunare è che contiene una registrazione degli effetti dei raggi cosmici di bassa energia che penetrano solo un piccolo spessore. In una meteorite questa registrazione è stata completamente distrutta da ablazione durante il passaggio attraverso l'atmosfera terrestre. Lo studio della radiazione cosmica sia nelle meteoriti sia nel materiale lunare e il confronto dei risultati dovrebbe portare a nuove interessanti scoperte.

I meccanismi cerebrali durante il movimento

Generalmente si pensa che le funzioni cerebrali più elevate siano mediate nella corteccia cerebrale. Tuttavia, nel controllo dei muscoli, la funzione superiore può forse dipendere da centri situati in profondità nel cervello

di Edward V. Evarts

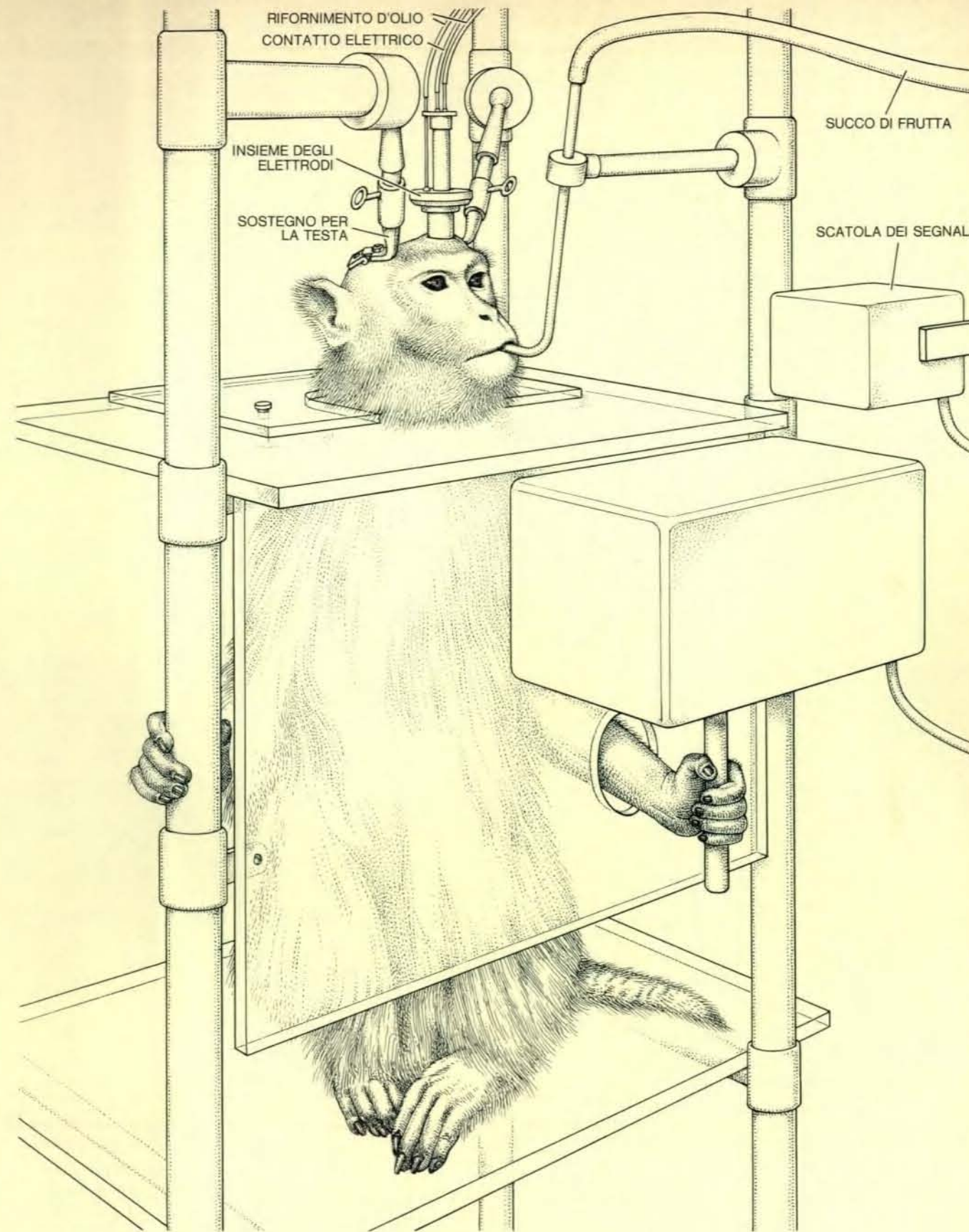
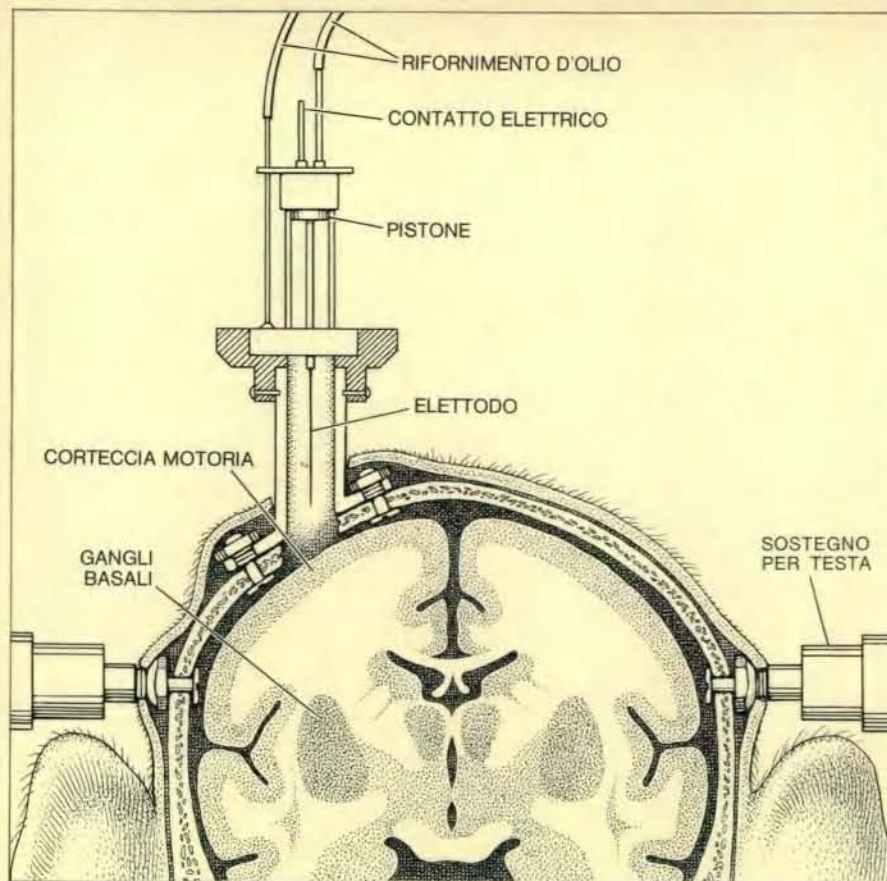
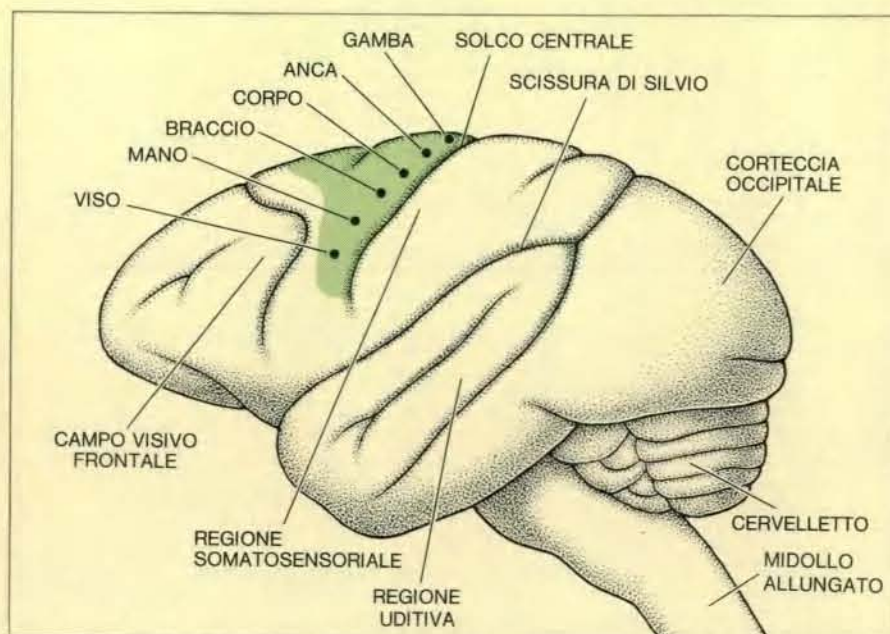
La visione tradizionale del cervello è quella secondo la quale il livello superiore nella sua organizzazione gerarchica si trova nella corteccia, o parte esterna, del cervello. Questo non si è rivelato esatto per quanto riguarda le funzioni motorie del cervello: il controllo e l'integrazione dei movimenti muscolari. Le ricerche sul cervello hanno gradualmente rivelato che l'area motoria della corteccia cerebrale si trova in effetti a un livello piuttosto basso nel sistema di controllo motorio, non lontano dall'apparato muscolare stesso. Le strutture situate in profondità, al di sotto della corteccia, si trovano a un livello funzionale superiore nel sistema, come si può giudicare dalla loro posizione nella catena nervosa di comando che dà inizio e controlla il movimento. Da queste scoperte deriva che la funzione principale della corteccia motoria del cervello non può essere la volontà, ma piuttosto il perfezionato controllo dell'attività motoria.

L'era attuale della ricerca sul modo in cui la corteccia cerebrale controlla il movimento cominciò circa 100 anni fa con gli studi del neurologo inglese John Hughlings Jackson. Partendo dai movimenti anormali che si manifestano nell'epilessia e dai movimenti normali assenti nell'apoplessia e nell'infarto, egli aveva proposto che il cervello fosse una macchina sensoriale-motoria, divisa in due differenti centri per la coordinazione delle sensazioni e del movimento. Dai sintomi di pazienti colpiti da infarto e dalla posizione anatomica del coagulo di sangue dei vasi danneggiati che provocano i sintomi, egli aveva concluso che la parte della corteccia cerebrale più direttamente interessata al movimento si trova nel territorio rifornito dall'arteria cerebrale media. Prove sperimentali a favore della teoria di Jackson sono state fornite da Gustav Theodor Fritsch e Edward Hitzig in Germania, che nel 1870 trovarono che la stimolazione elettrica di una regione in un emisfero cerebrale di cane provocava la contrazione dei muscoli sul lato opposto del corpo del cane. Nel 1874 Roberts Bartholow, un medico americano, dimostrò che la stimolazione elettrica della zona corticale proposta da Jackson come luogo del controllo motorio produceva contrazione muscolare. Questa zona viene ora chiamata corteccia motoria.

Jackson dedicò anche molti studi all'epilessia focale, una condizione nella quale i movimenti convulsivi sono limitati a una parte del corpo, per esempio il pollice. Egli propose che i movimenti localizzati fossero il risultato di un'attività elettrica abnorme in zone localizzate della corteccia e che tale attività desse a sua volta origine a contrazioni muscolari localizzate senza la partecipazione della volontà del paziente. Tali attacchi epilettici localizzati sono ora denominati col termine epilessia jacksoniana.

La scoperta che la contrazione muscolare potrebbe essere prodotta da stimolazione elettrica di una piccola regione della corteccia cerebrale fu una grossa sorpresa per i neurologi del tempo. Prima del lavoro di Jackson, Fritsch e Hitzig, si credeva generalmente che la corteccia cerebrale dell'uomo, che presenta notevoli circonvoluzioni, fosse implicata più nella generazione del pensiero che del movimento. La corteccia cerebrale era vista come l'organo di pensiero più elevato nell'uomo, e si pensava che i centri subcorticali, o inferiori, fossero i responsabili delle contrazioni muscolari. In effetti, il clima intellettuale dell'epoca rese necessario per Fritsch e Hitzig, affermare che « contrariamente alle opinioni di Fluorens e della maggior parte dei ricercatori che lo seguivano, in nessun caso l'anima rappresenta una sorta di funzione totale del cervello nel suo insieme, la cui espressione può essere distrutta da mezzi meccanici *in toto*, ma non nelle sue parti individuali. Le funzioni psicologiche individuali... dipendono, per il loro rapporto con la materia e per la loro origine da essa, da centri circoscritti della corteccia cerebrale ».

Tra il 1900 e il 1920 Charles S. Sherrington, il più importante neurofisiologo dell'epoca, applicò la tecnica della stimolazione elettrica allo studio sulle modalità in cui il cervello controlla il movimento. Sebbene egli abbia fatto delle scoperte importanti con questo procedimento, ne riconobbe i limiti: i movimenti prodotti dalla stimolazione elettrica del cervello non sono volontari e sono più simili ai movimenti dell'epilessia che ai movimenti della normale attività motoria. Sherrington vide la necessità di nuove tecniche e scrisse che esperimenti che potevano spiegare il normale funzionamento dei centri motori del cervello avrebbero richiesto « la combinazione dei metodi di psicologia comparata con i metodi di fisiologia sperimentale... per trovare nuovi dati importanti per quanto riguarda il movimento come risultato del lavoro del cervello ».

L'approccio psicofisiologico invocato da Sherrington non fu realizzabile per circa 50 anni a causa di problemi tecnici. Come risultato, la conoscenza dei processi motori del cervello rimase notevolmente indietro rispetto a quella dei processi sensoriali del cervello. Una difficoltà che si presentava nello studio dei movimenti volontari nasceva dalla necessità di avere una partecipazione attiva del soggetto in esperimento; questo escludeva l'uso di animali anestetizzati. Le ricerche sui processi senso-

Le registrazioni dell'attività di singole cellule nervose nel cervello si ottengono mentre una scimmia compie un esercizio che ha appreso in questa « sedia per scimmie » appositamente ideata nel laboratorio dell'autore all'Istituto nazionale delle malattie mentali. La testa della scimmia è immobilizzata senza dolore, così che il microelettrodo nel cervello non cambi posizione durante l'esperimento. La scimmia è stata allenata a muovere la barra verticale con una flessione del polso quando si accende una luce nella scatola dei segnali. Se essa compie il movimento richiesto entro un certo tempo specifico, riceve la ricompensa di un succo di frutta attraverso il tubo che ha in bocca. I segnali provenienti dal microelettrodo impiantato nel cervello, dalla scatola dei segnali e dai trasduttori connessi con la barra verticale vengono immessi per l'analisi in un calcolatore.

Il dispositivo di microelettrodi consiste in un sottile cavo di platino e iridio, attaccato a un pistone idraulico. Un cilindro di acciaio inossidabile fissato in permanenza al cranio della scimmia permette l'accesso al cervello. Anche i bulloni sui lati del cranio sono impiantati permanentemente. Durante l'esperimento essi sono attaccati ai supporti per evitare il movimento della testa. Dopo che il dispositivo di elettrodi è fissato al cilindro, l'elettrodo viene abbassato o sollevato pompando olio nei due tubi.

Nell'illustrazione viene raffigurata la corteccia cerebrale di un cervello di scimmia con la corteccia motoria che controlla il movimento muscolare (*in colore*). La stimolazione elettrica dei punti indicati sulla corteccia motoria provoca contrazione involontaria del gruppo di muscoli corrispondenti sul lato opposto del corpo. Un danno alla zona della corteccia motoria provoca di solito una paralisi dei muscoli controllati da quella zona. Il campo visivo frontale è implicato nei movimenti dell'occhio.

riali progredirono rapidamente perché le funzioni sensoriali si potevano invece analizzare in animali anestetizzati. Per esempio, la fisiologia dei recettori della vista poteva essere studiata in animali anestetizzati, ma non si poteva fare altrettanto per studiare la fisiologia dei movimenti dell'occhio, poiché per tali studi sono necessari animali in grado di percepire, di prestare attenzione e di coordinare le funzioni motorie.

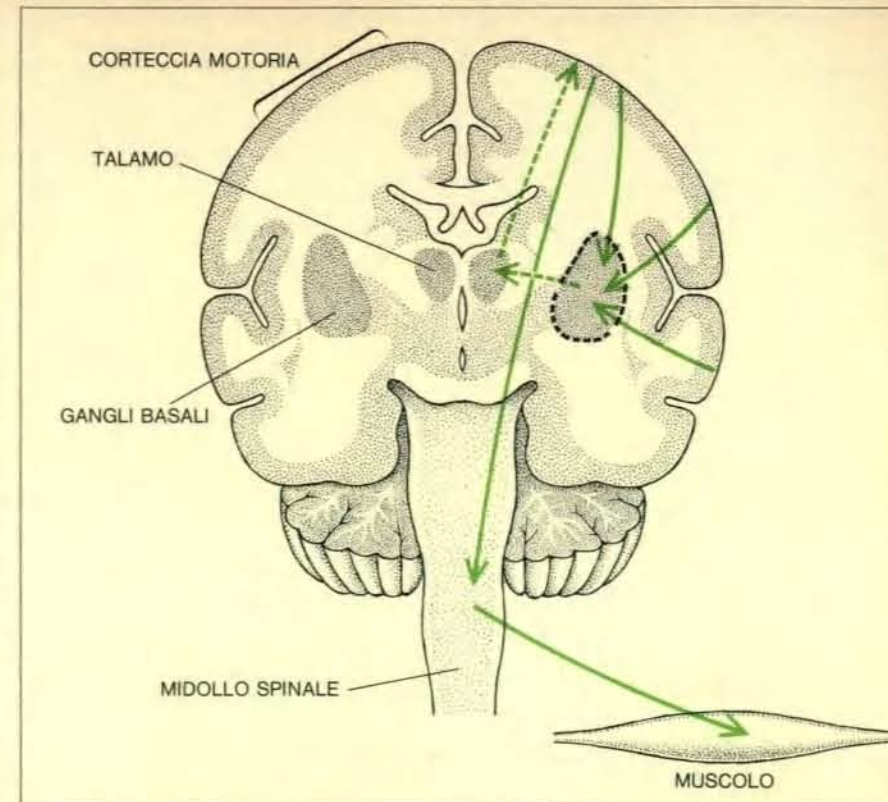
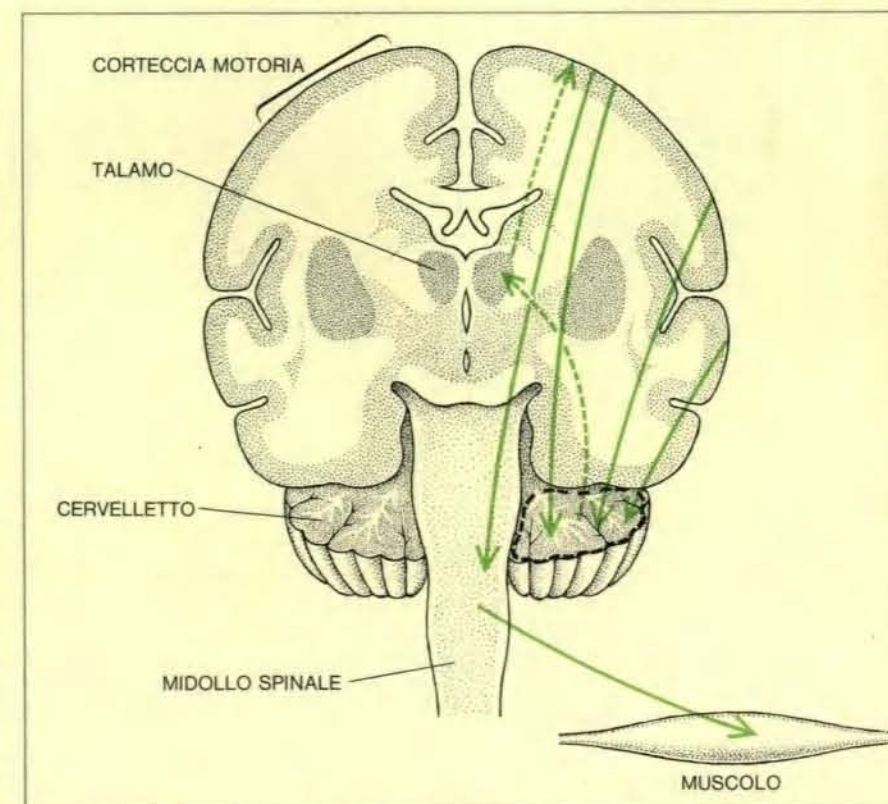
Il problema fu in parte risolto negli anni 20, quando i fisiopsicologi elaborarono delle tecniche per condizionare gli animali a svolgere certi movimenti che potevano essere sistematicamente modificati e che potevano essere facilmente osservati e registrati in laboratorio. Lo scoglio piú importante era di trovare un modo per registrare l'attività elettrica delle singole cellule nervose nel cervello di animali non anestetizzati. Le cellule nervose del cervello sono estremamente piccole e allo scopo di registrare la loro attività elettrica si deve introdurre un microelettrodo per circa 50 micron nella membrana della cellula nervosa. Inoltre il microelettrodo deve rimanere in posizione anche quando l'animale si muove. Circa 15 anni fa, Herbert H. Jasper dell'Istituto neurologico di Montreal elaborò delle tecniche per registrare l'attività di singole cellule nervose in animali che eseguivano movimenti appresi. Il suo contributo fu di miniaturizzare il sistema per mettere in posizione il microelettrodo nel cervello. L'intero apparecchio che egli elaborò si può attaccare al cranio dell'animale, in modo che i movimenti della testa non facciano spostare l'elettrodo di registrazione (*si veda la figura in alto a sinistra*).

La corteccia motoria del cervello è stata per lungo tempo il punto focale delle ricerche sul modo in cui il cervello controlla i movimenti muscolari, ma oggi gli studi neurofisiologici si interessano del cervelletto e cosí pure dei gangli basali (*si vedano le illustrazioni nella pagina a fronte*). L'obiettivo delle ricerche attuali è di chiarire come queste tre parti interconnesse del cervello – la corteccia motoria, il cervelletto e i gangli basali – agiscano insieme nel controllo del movimento.

È noto che un danno alla corteccia motoria provoca paralisi, ma che un danno ai gangli basali o al cervelletto produce anomalie, piuttosto che abolizione del movimento. Per esempio, i sintomi del morbo di Parkinson, un disturbo neurologico risultante da danni ai gangli basali, comprendono delle caratteristiche attive come tremore e rigidità muscolare e caratteristiche negative come rallentamento dell'inizio del movimento e perdita della abituale espressione facciale per le emozioni. La gravità dei disturbi motori dipende non tanto da quali muscoli sono utilizzati, ma piuttosto dal modo in cui i muscoli sono utilizzati. Un paziente affetto dal morbo di Parkinson può talvolta compiere un movimento molto veloce, in modo quasi normale, mentre un momento dopo può avere gravi difficoltà per iniziare un movimento lento con gli stessi muscoli.

Un danno al cervelletto provoca una anormalità dei movimenti che è quasi l'opposto dell'anormalità causata da un danno ai gangli basali. Con un disturbo al cervelletto, il tremore muscolare è piú grave durante i movimenti volontari e molto meno marcato quando i muscoli sono a riposo. Sembra chiaro che i tre centri del controllo del movimento siano funzionalmente interdipendenti. Ma, in quale ordine di tempo diventano attivi e quale aspetto del movimento ognuno di essi controlla? La registrazione dell'attività delle singole cellule nervose nel cervello durante il movimento di muscoli specifici, potrà essere d'aiuto per rispondere a queste domande.

Uno dei primi studi effettuati con microelettrodi richiedeva che si determinasse il tempo nel quale le cellule nervose della corteccia motoria delle scimmie si eccitavano quando la scimmia eseguiva un semplice movimento della mano. La scimmia veniva allenata a spingere un tasto telegrafico e ad aspettare la comparsa di una luce che si accendeva a tempi non preordinati. Se la scimmia lasciava il tasto telegrafico entro 350 millisecondi, o meno, dopo la comparsa della luce, veniva premiata con qualche goccia di succo di frutta. Registrando simultaneamente sia le scariche delle cellule cerebrali che le scariche dei muscoli, si trovò che le cellule della corteccia motoria diventavano attive prima della contrazione muscolare. Questo, unitamente alle note connessioni anatomiche, indica che le cellule nella corteccia motoria sono dei componenti del circuito che dà inizio alla risposta motoria.

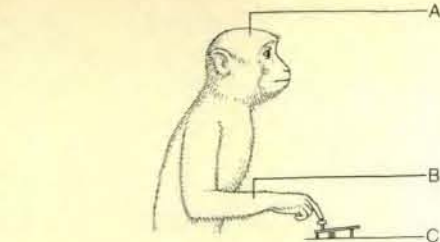
Immediatamente adiacente alla corteccia motoria è la corteccia sensoriale che riceve impulsi da terminazioni nervose della pelle e delle articolazioni. Le registrazioni fatte da cellule nervose nella zona sensoriale ricevente presentavano attività dopo, piuttosto che prima dell'inizio della contrazione muscolare, e questo sta a indicare che, sebbene queste cellule abbiano un ruolo nel guidare il movimento sulla base di un meccanismo di retroazione, esse

I gangli basali ricevono gli stimoli da una vasta zona della corteccia cerebrale e mandano segnali alla corteccia motoria per mezzo del talamo. Quando il funzionamento dei gangli basali è menomato, i segnali che passano attraverso la corteccia motoria sono alterati (*linee tratteggiate in colore*) e provocano dei disturbi nel soggetto: tremore muscolare quando è in condizione di riposo e difficoltà nell'iniziare il movimento.

Il cervelletto riceve stimoli da una vasta zona della corteccia celebrale. Quando si verificano danni al cervelletto essi danno luogo a dei segnali alterati (*linee tratteggiate in colore*) che arrivano alla corteccia motoria attraverso il talamo. Questo provoca nel soggetto un tremore muscolare che è piú grave nel movimento volontario.

non si trovano nel circuito che dà inizio alla prima contrazione muscolare. La corteccia sensoriale non è la sola regione del cervello che riceve forti stimoli dai recettori periferici collegati con il controllo del movimento. Il cervelletto, per esempio, riceve forti stimoli dall'apparato vestibolare che percepisce l'equilibrio del corpo, e dai recettori muscolari. Si credeva comunemente che il ruolo principale del cervelletto fosse la regolazione del movimento in risposta ai segnali che partivano dai muscoli dopo che essi avevano cominciato a contrarsi. Fu quindi una sorpresa quando W. Thomas Thach, jr. della Scuola di medicina dell'Università di Yale, scoprí che le variazioni dell'attività cerebrale avvenivano prima del movimento. Quindi Mahlon De Long dell'Istituto nazionale delle malattie mentali estese gli studi ai gangli basali e trovò che anche le cellule nervose in quella regione diventano attive prima della contrazione muscolare.

La scoperta che tutte e tre le regioni motorie si eccitano prima che ci sia il movimento ha portato a una visione nuova sulla relazione funzionale esistente tra le tre strutture. L'intera corteccia cerebrale invia fibre a entrambi i gangli basali e al cervelletto e queste due strutture a loro volta inviano delle massicce connessioni a ritroso verso la corteccia motoria attraverso il talamo. In tal modo, i gangli basali e il cervelletto ricevono informazioni dalle regioni somato-sensitiva, visiva e uditiva della corteccia cerebrale, trasformano questa informazione e inviano poi un nuovo tipo di segnale alla corteccia motoria. Mentre l'opinione tradizionale riteneva che la corteccia motoria cerebrale rappresentasse il livello piú elevato di integrazione motoria e che le strutture subcorticali fossero a un livello superiore, vale a dire piú vicine al muscolo, sembra oggi che la situazione sia completamente l'opposto. Gli stimoli che arrivano al cervelletto e ai gangli basali possono essere codificati in una maniera piú astratta e piú complessa degli stimoli che arrivano alla corteccia motoria. Inoltre la corteccia motoria è connessa piú direttamente con i neuroni motori del midollo spinale, piuttosto che con il cervelletto o con i gangli basali.

Sebbene tutte e tre le piú importanti regioni motorie del cervello diventino attive prima del movimento, ogni regione è interessata in aspetti ben diversi del controllo motorio. Quando ebbero inizio gli studi per determinare gli aspetti di movimenti controllati dalla corteccia motoria, sembrava che ci fossero due possibili alternative: controllo della lunghezza muscolare o controllo della tensione muscolare. In altre parole, si chiedeva: gli impulsi che partono dalla corteccia motoria specificano lo spostamento che deve prodursi o specificano la forza richiesta per produrre lo spostamento? La corteccia motoria controlla la direzione e l'entità del movimento, o controlla la direzione e l'importanza delle forze che sono interessate al movimento? Numerosi studi sulle prestazioni motorie nell'uomo hanno fornito prove a favore di entrambi le possibilità. Come è stato sottolineato da un ricercatore, J. A. V. Bates dell'Ospedale nazionale per le malattie nervose di Londra, « la forza può essere considerata come la quantità fondamentale di potenza sviluppata dal corpo; la velocità è il suo integrale semplice e lo spostamento l'integrale doppio. Cercare di ottenere una velocità voluta e uno spostamento voluto è cosí in teoria un'operazione molto complessa rispetto al tentativo di ottenere una forza desiderata, ma contro questo si potrebbe sottolineare che la nostra esperienza quotidiana richiede una potenza sviluppata per spostamenti precisi, vale a dire per lo sviluppo di integrali doppi ».

Al fine di stabilire le attività principali della corteccia motoria, con i miei colleghi dell'Istituto nazionale delle malattie nervose, ho ideato un esperimento che implicava l'addestramento di una scimmia a svolgere un esercizio nel quale la direzione della forza e la direzione dello spostamento potevano essere variate indipendentemente. Un pannello con un'asta verticale che poteva essere afferrata con una mano veniva montato nella gabbia della scimmia. La scimmia riceveva la ricompensa di un succo di frutta quando la velocità con cui la leva veniva mossa avanti e indietro cadeva entro certi intervalli di tempo. I limiti venivano ristretti man mano che la scimmia migliorava la sua capacità di svolgere l'esercizio. Infine la scimmia era addestrata a spostare la leva in un tempo superiore a 400 millisecondi, ma inferiore a 700. Prima di ricevere la ricompensa, la scimmia doveva compiere in modo corretto due spostamenti successivi. La leva veniva spostata mediante un piegamento del polso seguito da un raddrizzamento (flessione seguita da estensione) o viceversa.

Il ciclo richiesto consisteva di spostamenti o di flessione o di estensione nei limiti di tempo, seguiti o da estensioni, o da flessioni, anche esse entro i limiti di tempo. Alla leva veniva attaccato un peso con una corda e la corda veniva fatta passare sopra una

A destra viene mostrata la relazione temporale tra la scarica di una cellula nervosa nella corteccia motoria e un semplice movimento della mano. Una scimmia è stata allenata a premere un tasto telegrafico e poi a lasciarlo entro 350 millisecondi dopo che si è accesa una luce. I tracciati in alto (*A*) mostrano l'attività di una singola cellula nervosa nella regione del braccio della corteccia motoria, che veniva registrata da un microelettrodo impiantato nel cervello. I tracciati hanno inizio nel momento in cui compare il segnale luminoso. In una serie di prove, la cellula nervosa diventava attiva per prima, di solito entro 150 millisecondi dal segnale. Poi eseguiva una contrazione dei muscoli del braccio (*B*) che veniva registrata da un elettromiografo. Il tracciato *C* mostra la situazione quando il tasto telegrafico è sollevato.

A destra è raffigurata l'attività selettiva di una singola cellula nervosa della corteccia motoria durante un movimento del polso. Una scimmia veniva addestrata a muovere una barra verticale tra due sostegni. Quando il tracciato *B* è al suo punto piú basso, il polso è esteso. Quando è al suo punto piú alto, il polso è flesso o piegato in avanti. Le registrazioni da una singola cellula nervosa della corteccia motoria (*A*) venivano eseguite durante i movimenti. Quando nessun peso si opponeva al movimento (*in alto a sinistra*) la cellula era attiva durante la flessione, ma non durante l'estensione. Quando si aggiungeva un peso di 400 grammi che si opponeva alla flessione (*in basso a sinistra*) la cellula diventava molto piú attiva sia durante la flessione che l'estensione. Quando il peso di 400 grammi era opposto all'estensione, la cellula diventava quasi « silenziosa » (*in alto a destra*). Quando non si opponeva alcun peso, la cellula presentava l'andamento iniziale (*piú in basso a destra*).

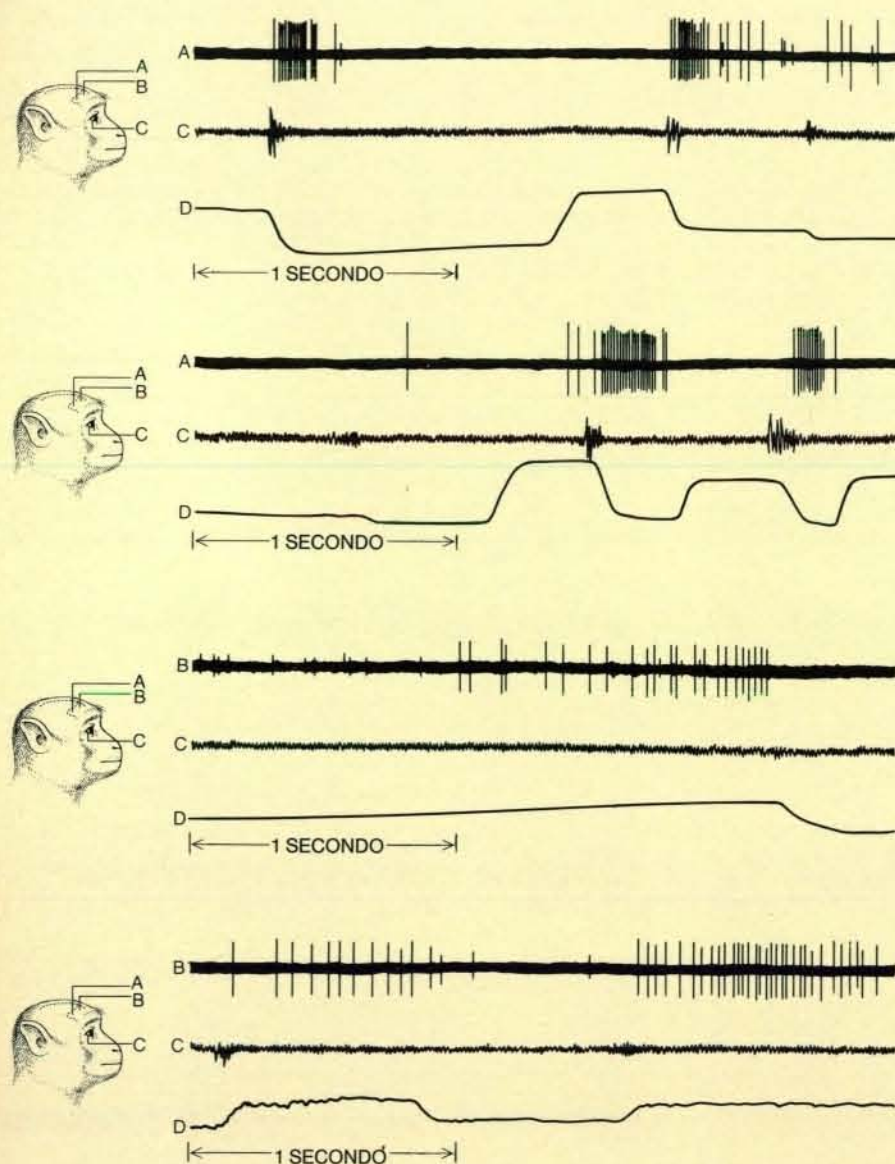
A destra è mostrata la relazione tra l'attività della cellula nervosa della corteccia motoria e il peso sopportato da un braccio. La scimmia veniva addestrata a tenere una leva verticale tra due sostegni. I pesi erano posti a volte per far opposizione alla flessione del polso e a volte per opporsi all'estensione. Anche l'entità del peso variava di volta in volta. Le registrazioni da una singola cellula nervosa nella corteccia motoria venivano fatte con un microelettrodo (*A*). Il tracciato *B* indica lo spostamento della barra e l'arco indica il momento in cui la scimmia afferrava la barra. I tracciati riportati a sinistra, mostrano l'attività della cellula nervosa quando i muscoli flessori sopportavano pesi rispettivamente di 400 grammi (*in alto*), di 200 grammi (*al centro*) e di 100 grammi (*in basso*). I tracciati a destra mostrano l'attività della cellula nervosa quando i muscoli estensori sopportavano la stessa sequenza di pesi con cui sono state fatte le registrazioni di sinistra.

di due pulegge in modo che il peso si opponesse alla flessione del polso e tendesse a tirare il polso in posizione estesa. La scimmia doveva esercitare una forza in direzione della flessione e, anche quando il peso veniva abbassato, i muscoli flessori dovevano esercitare una forza per impedire che cadesse troppo rapidamente. Quando la corda veniva fatta passare sull'altra puleggia, la situazione si invertiva: il peso adesso si opponeva ai muscoli estensori e come risultato la scimmia doveva esercitare una forza in direzione dell'estensione. Durante l'addestramento, sia le dimensioni del peso che la direzione in cui esso agiva venivano variate in modo che la scimmia imparava a compiere movimenti della durata richiesta indipendentemente da queste variabili.

Quando la scimmia era stata completamente addestrata nella sua gabbia, veniva successivamente addestrata a svolgere la stessa serie di movimenti del polso in una sedia speciale equipaggiata con un apparato di registrazione. Quando le prestazioni della scimmia erano soddisfacenti veniva impiantato nel suo cervello un microelettrodo e venivano effettuate delle registrazioni su una singola cellula nervosa nella corteccia motoria, mentre essa svolgeva l'esercizio. I risultati mostravano che l'attività delle cellule nervose nella corteccia motoria erano in relazione con l'entità e il tipo di contrazione muscolare, piuttosto che con lo spostamento che la contrazione produce (*si veda l'illustrazione in basso alle pagine 48 e 49*).

Il significato di queste osservazioni può essere piú facilmente afferrato immaginando cosa succede quando si sollevano pesi diversi. Supponete di tenere in mano una palla da tennis e di muovere il braccio su e giú lungo una distanza fissa e a una velocità fissa. Sostituite quindi la palla da tennis con una palla d'acciaio e ripetete il movimento del braccio esattamente allo stesso modo. Per un osservatore esterno non ci sarebbe nessuna differenza tra i movimenti del braccio con le due palle. Entrambi i movimenti sarebbero lungo la stessa distanza e alla stessa velocità. Tuttavia, il tipo di attività della vostra corteccia motoria è del tutto diverso per i due movimenti, poiché la contrazione muscolare richiesta per sollevare la pesante palla di acciaio è diversa dalla contrazione necessaria per sollevare la leggera palla da tennis.

Un altro problema sul modo in cui i movimenti vengono controllati è se il tipo di attività di una regione motoria è in rapporto solo con gli aspetti fisici del movimento o se ci sono diversi tipi di attività che sono associati con lo stesso movimento fisico. Per esempio, quando le contrazioni muscolari sono esattamente le stesse, il tipo di attività dell'area motoria è lo stesso per i movimenti appresi e per i movimenti riflessi innati? Quando si pensava che la corteccia motoria cerebrale rappresentasse il livello piú elevato del sistema di controllo motorio, sembrava logico assumere che le sue cellule nervose fossero implicate piú nei movimenti appresi che in quelli riflessi, ma quando si è registrata l'attività di cellule nervose della corteccia motoria in associazione a movimenti naturali come grattarsi, mangiare e rassettare, e anche in associazione a movimenti appresi molto bene come le prestazioni reazione-tempo, si trovò che la corteccia motoria partecipava al controllo del movimento, senza tener conto se il movimento fosse innato o appreso. In entrambi i tipi di movimento, l'attività delle cellule nervose della corteccia motoria era riferita a quello che i muscoli facevano, piuttosto che alle circostanze in cui lo facevano.

Questo non significa che ci sia una

Due tipi di cellule nervose del campo visivo frontale della corteccia cerebrale mostrano quadri diversi di attività anche se entrambi sono interessati al controllo di muscoli dello stesso occhio. Le registrazioni dell'attività delle singole cellule nervose del campo visivo frontale fatto da Emilio Bizzi mostrano che il primo tipo di cellule (*A*) emette delle scariche durante i movimenti rapidi, volontari dell'occhio e un secondo tipo di cellule (*B*) emette le scariche durante i movimenti lenti di ricerca e quando si mantiene lo sguardo fisso. Sono stati registrati: l'attività elettromiografica di un muscolo dell'occhio (*C*) e i movimenti dell'occhio (*D*). I tracciati in alto mostrano una cellula (*A*) che emette delle scariche durante i movimenti bruschi. I tracciati in basso mostrano la scarica di una cellula differente (*B*) durante i movimenti lenti di ricerca (*B superiore*) e quando l'occhio resta in posizione fissa (*B inferiore*).

relazione lineare tra le cellule della corteccia motoria e le cellule motorie del midollo spinale. Al contrario, ci sono parecchie differenze tra il tipo di attività delle cellule nervose della corteccia motoria e l'attività delle cellule nervose motorie del midollo spinale. Può darsi che la relazione delle cellule nervose della corteccia motoria con le cellule nervose motorie del midollo spinale sia simile alla relazione tra le cellule del nucleo genicolato laterale (una stazione intermedia tra la retina e la corteccia visiva) e le cellule della regione visiva della corteccia. Le cellule del nucleo genicolato laterale e della corteccia rispondono alla posizione dello stimolo sulla retina, ma, se ci sono delle caratteristiche nello stimolo, esse verranno elaborate dalla corteccia visiva. Piú o meno allo stesso modo sembra che l'attività delle cellule nervose della corteccia motoria possa essere messa in rapporto con certi tipi di attività di un gruppo di muscoli, mentre l'attività delle cellule nervose motorie del midollo spinale è in rapporto soltanto con un singolo gruppo di fibre di un solo muscolo.

Tuttavia in regioni della corteccia cerebrale esterne alla corteccia motoria, l'attività nervosa è talvolta piú dipendente dal contesto in cui il movimento si verifica che dall'attività muscolare in sé. Per contesto si intende la circostanza mentale o intenzionale associata al movimento di un insieme di muscoli: se il movimento è volontario o involontario, appreso o innato, veloce o lento. Per esempio, nell'occhio gli stessi muscoli servono per movimenti bruschi e per movimenti lenti di ricerca. I movimenti bruschi sono degli scatti rapidi per cui lo sguardo si sposta da un punto di fissazione a un altro. Il movimento lento di ricerca è il seguire un oggetto in movimento in modo tale che l'immagine rimanga stazionaria sulla retina. Delle registrazioni fatte da Emilio Bizzi all'Istituto di tecnologia del Massachusetts nella regione corticale frontale (esterna alla corteccia motoria) riguardante il controllo dei movimenti dell'occhio, hanno rivelato che un gruppo di cellule nervose partecipava ai movimenti bruschi e un altro gruppo era implicato nei movimenti di ricerca, anche se gli stessi muscoli erano interessati a entrambi i movimenti. Cosí l'attività di cellule nervose di questa regione corticale frontale non è associata con l'attività muscolare, come è nella corteccia motoria, ma piuttosto con il tipo di movimento. Nella corteccia motoria, d'altro canto, si è visto che lo stesso gruppo di cellule nervose controlla la contrazione dei muscoli del braccio senza tener conto delle circostanze o del contesto del movimento.

Hans H. Kornhuber della Università di Ulma ha proposto che le cellule del cervelletto e dei gangli basali siano anche attive in modo differenziale a seconda del tipo di movimento, piuttosto che secondo l'attività muscolare. Raccogliendo prove sia da pazienti con disturbi di movimento che da studi sperimentali su animali, nel 1971 Kornhuber ha proposto che il ruolo piú importante del cervelletto sia di prestabilire e dare inizio a veloci movimenti bruschi o di proiezione, mentre il ruolo piú importante dei gangli basali è di dare origine a movimenti lenti. Per provare questa ipotesi per i gangli basali, DeLong ha eseguito studi sull'attività di cellule singole nei gangli basali di scimmie addestrate a compiere un rapido movimento di un arto in risposta a una luce rossa, e un movimento lento ben controllato in risposta a una luce verde. DeLong trovò che un'elevata percentuale di cellule connesse con il movimento in una gran parte delle cellule basali si eccitava molto di piú per il movimento lento che per quello veloce. Sebbene i risultati siano in accordo con l'ipotesi di Kornhuber, l'esatto ruolo di queste cellule nel controllo dei movimenti lenti necessita di ulteriori ricerche. In ogni caso è chiaro che a paragone della corteccia motoria, che è implicata sia nel movimento lento che in quello veloce, i gangli basali sono preferenzialmente attivi nei movimenti lenti. Lo stimolo proveniente dai gangli basali, che presumibilmente serve a modulare l'eccitazione corticale, raggiunge la corteccia motoria attraverso il talamo.

Anche il cervelletto manda le fibre alla corteccia motoria per mezzo del talamo, ma ancora non abbiamo prove sperimentali dirette sullo speciale tipo di movimento che le cellule nervose del cervelletto controllano. Tuttavia, dati clinici e anatomici suggeriscono che il cervelletto possa avere un ruolo speciale nei movimenti rapidi. In effetti, Kornhuber ha proposto che il cervelletto e i gangli basali siano strutture complementari, dove il cervelletto controlla i movimenti rapidi e i gangli basali controllano i movimenti lenti. I risultati ottenuti fino a oggi dalla registrazione dell'attività di singole cellule nervose con microelettrodi e con la determinazione del rapporto tra le registrazioni e il controllo del movimento sono piuttosto frammentari. I loro limiti servono a sottolineare quanto ancora rimane da imparare. Un campo di ricerca particolarmente promettente per il prossimo futuro è l'analisi dei disturbi motori indotti sperimentalmente nelle scimmie, disturbi che sono molto simili ai disturbi motori riscontrati nell'uomo, per esempio il morbo di Parkinson. La scoperta di errori neurofisiologici in tali modelli sperimentati di disturbi motori sarà di aiuto nel preparare e provare farmaci terapeutici. Molti pazienti affetti dal morbo di Parkinson presentavano infatti dei miglioramenti evidentissimi dopo aver preso il farmaco L-dopa.

I pazienti che soffrono del morbo di Parkinson presentano disturbi emotivi e cosí pure muscolari. Altre malattie dei gangli basali, alcune delle quali geneticamente determinate, sono associate con disturbi psicologici. Questo sta a indicare che i gangli basali possono essere la regione che fornisce il piú importante legame associativo tra zone sensoriali piú specializzate del sistema nervoso e la zona motoria.

L'importanza degli studi che ho descritto si estende alla psicologia e alla psichiatria. In effetti, sembra possibile che la comprensione del sistema nervoso umano, perfino nelle sue funzioni intellettuali piú complesse, possa essere arricchita se il funzionamento del cervello è analizzato per quanto riguarda l'emissione di segnali motori piuttosto che per quanto riguarda la recezione di stimoli sensoriali. In passato sono stati fatti numerosi tentativi per descrivere le funzioni superiori del cervello per quanto riguarda in quale modo gli stimoli sensoriali siano elaborati partendo dal recettore fino a giungere ai centri corticali superiori. Una valida soluzione alternativa è stata proposta da Roger W. Sperry dell'Istituto di tecnologia della California. Concluderò con il suo commento: « Invece di guardare all'attività motoria come a un'attività sussidiaria, cioè qualcosa per compiere, servire e soddisfare la richiesta dei centri superiori, capovolgiamo questa tendenza e guardiamo all'attività mentale soltanto come a un mezzo rivolto verso un fine, dove il fine è la miglior regolazione della risposta chiara. Lo sviluppo del cervello serve essenzialmente per apportare ulteriori miglioramenti al comportamento motorio, per facilitarne la tendenza verso degli obiettivi distanti e futuri, per una maggiore capacità di adattamento in genere e in definitiva ai fini della sopravvivenza. L'aumento che si è avuto nel corso dell'evoluzione nella capacità dell'uomo di percepire, sentire, ideare, immaginare e cosí via, si può ritenere non solo come fine a se stesso, ma anche come qualcosa che ci ha permesso di comportarci piú saggiamente ed efficientemente ».

Tettonica a zolle e risorse minerarie

I modelli della deriva dei continenti e dell'espansione dei fondali oceanici forniscono indizi per la localizzazione di minerali importanti dal punto di vista economico. Tali indizi hanno già rivelato vari giacimenti interessanti

di Peter A. Rona

In questo periodo stiamo assistendo a una rivoluzione scientifica che, nel corso degli ultimi cinque anni, ha già mutato la visione del nostro pianeta tanto quanto la rivoluzione copernicana aveva cambiato quella medioevale del sistema solare. La rivoluzione copernicana implicava un radicale mutamento nella concezione del sistema planetario da geocentrica a eliocentrica e ha condotto allo sviluppo dell'astronomia moderna e alla esplorazione dello spazio. L'attuale rivoluzione scientifica implica un mutamento radicale nella visione che l'uomo aveva del suo pianeta: da una Terra statica si è passati a una Terra dinamica; questo mutamento lascia prevedere vantaggi paragonabili a quelli della rivoluzione copernicana, alcuni dei quali possono anche essere di natura economica. Solo ora, infatti, cominciano ad affiorare le prime conclusioni che possono essere tratte dalla nuova tettonica globale in relazione alle risorse minerarie e in particolare a quelle dei fondali oceanici.

Attualmente le uniche risorse minerarie sottomarine di sicuro interesse economico sono le estese riserve di idrocarburi liquidi e gassosi che sono state rinvenute entro la maggior parte delle piattaforme e scarpate continentali; a queste si aggiungono i depositi di ghiaia, di sabbia, di conchiglie e i depositi sedimentari di diversi altri minerali racchiusi nelle piattaforme continentali in correlazione diretta o meno con giacimenti noti sul continente adiacente; i fondali oceanici profondi, inoltre, offrono estesi accumuli di noduli di manganese. Non si può dire quindi che la nostra conoscenza delle risorse minerarie dei fondali oceanici sia particolarmente estesa, ma, anche nei suoi limiti, essa può essere considerata notevole se si tiene conto delle difficoltà incontrate nell'acquisirla. Cerchiamo infatti di immaginare quale sarebbe la nostra conoscenza dei giacimenti minerari continentali se potessimo studiarli soltanto da bordo di un aerostato che volasse a un'altitudine di una decina di chilometri e se la possibilità di campionamento fosse limitata al fatto di sospendere all'estremità di un cavo un secchio che dragasse le rocce più tenere affioranti sulla superficie del continente. Che possibilità avremmo di trovare i principali giacimenti conosciuti che si estendono generalmente su una superficie di non più di un paio di chilometri quadrati?

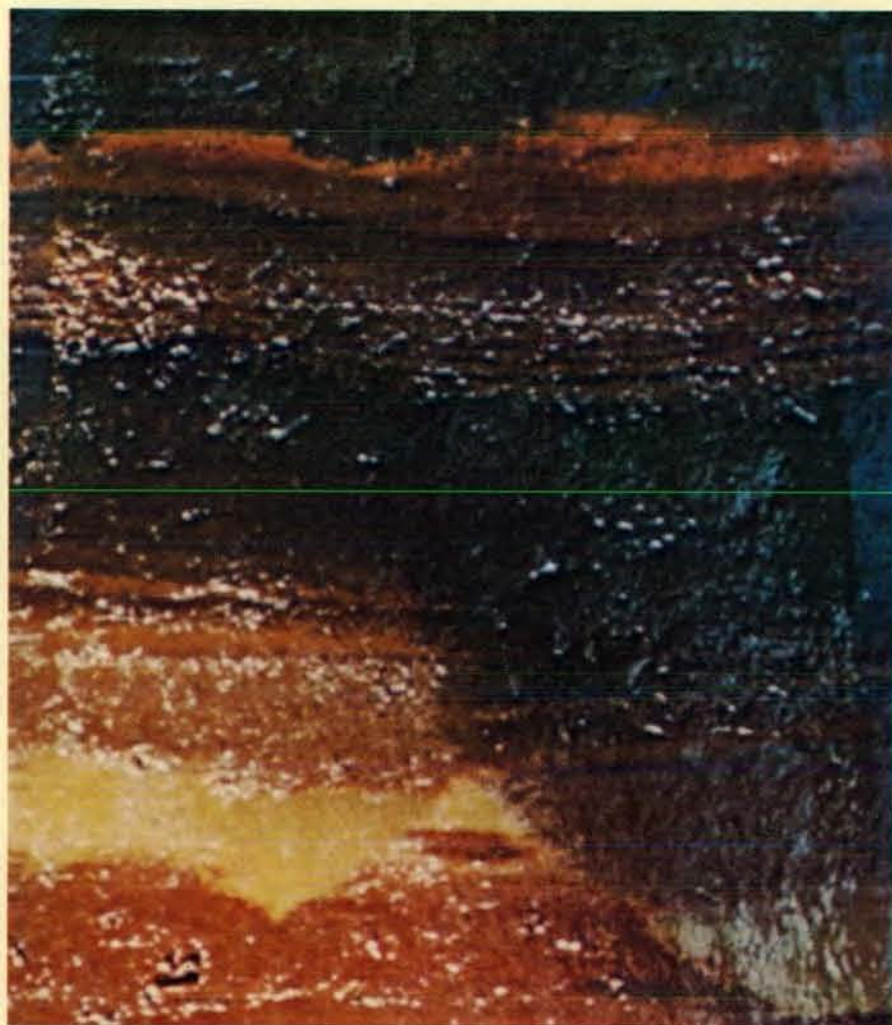
Questo esempio, seppure grossolano, descrive con una certa precisione, l'attuale capacità dell'uomo di raccogliere campioni dei sedimenti e delle rocce del fondale oceanico, utilizzando una gran varietà di strumenti di campionamento, di perforazione e di dragaggio che vengono calati dalle navi su di un'area vasta il doppio di tutti i continenti e lontana quanto è profondo l'oceano. Se si fa una media su tutti gli oceani del mondo, si scopre che le operazioni di campionamento effettuate per stabilire la distribuzione delle rocce del fondo oceanico sono soltanto di circa 3 dragaggi per milione di chilometri quadrati.

Negli ultimi anni, ciascuna delle principali scoperte di risorse minerarie nascoste è stata preceduta dalla formulazione di un quadro teorico del problema. Per esempio, una volta che i geologi ebbero compreso che vi era una precisa relazione tra la struttura anticlinale e l'accumulo di petrolio, da allora essi seppero dove perforare; di conseguenza il ritmo delle scoperte di giacimenti petroliferi divenne più serrato. Allo stesso modo, un quadro concettuale corretto può essere utilizzato con profitto per sopperire alla limitata conoscenza diretta che l'uomo ha delle risorse dei bacini oceanici. La validità di tale quadro concettuale può essere stabilita osservando se esso spiega coerentemente le osservazioni ed è in grado di permettere la formulazione di previsioni.

Il vecchio quadro concettuale che prevedeva una Terra statica, implicava che continenti e bacini oceanici fossero strutture permanenti, presenti sulla Terra fin dagli inizi della sua storia, cioè circa 4,5 miliardi di anni fa. Si erano scoperti così, e per lo più attraverso tentativi ed errori, soltanto i più accessibili fra i giacimenti minerari continentali e comunque sempre senza capire perché esistessero e perché proprio in quel luogo. Il recente passaggio a un quadro concettuale basato su un modello dinamico della Terra, nel quale i continenti sono in movimento costante, mentre i bacini oceanici si aprono e si chiudono, sta conducendo verso una migliore comprensione della distribuzione dei depositi minerari sia nello spazio sia nel tempo.

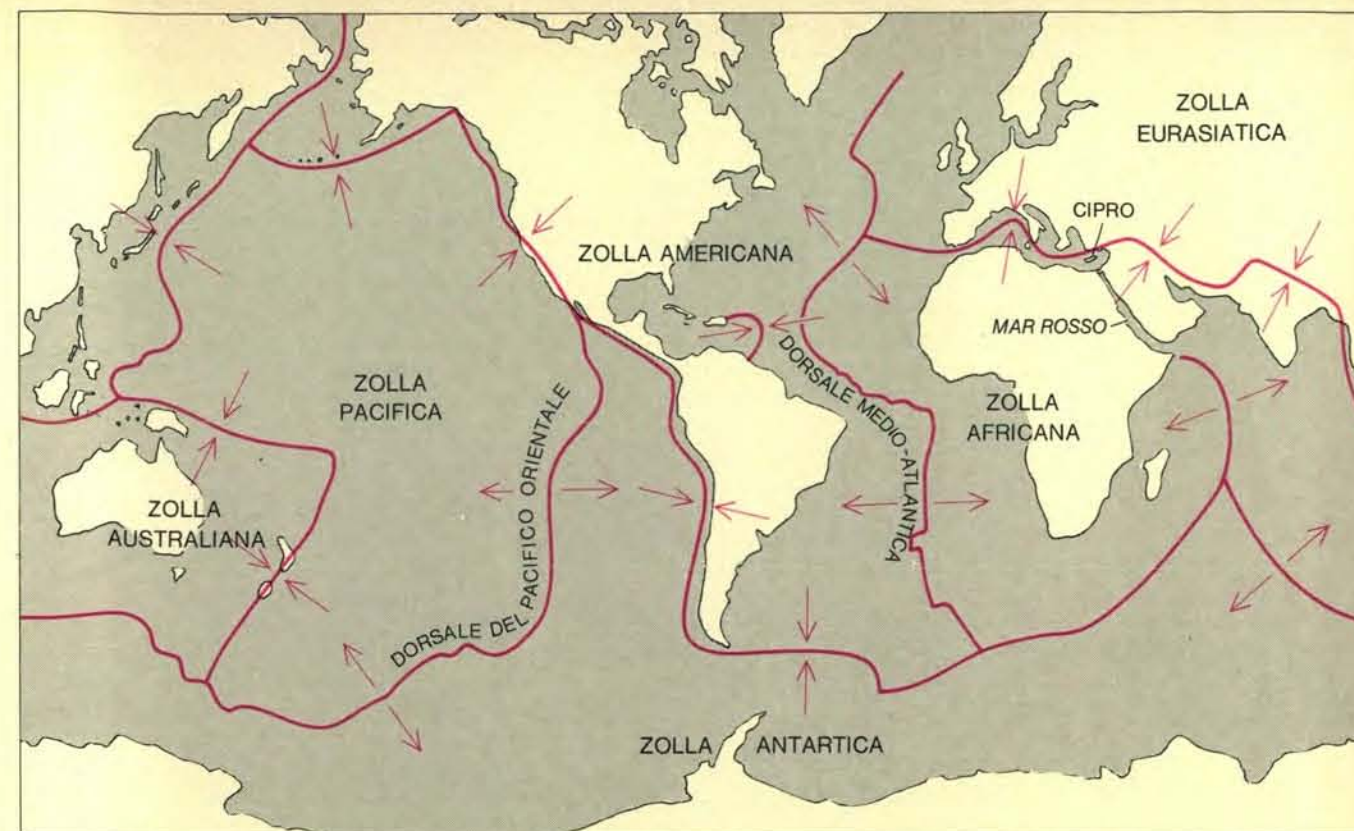
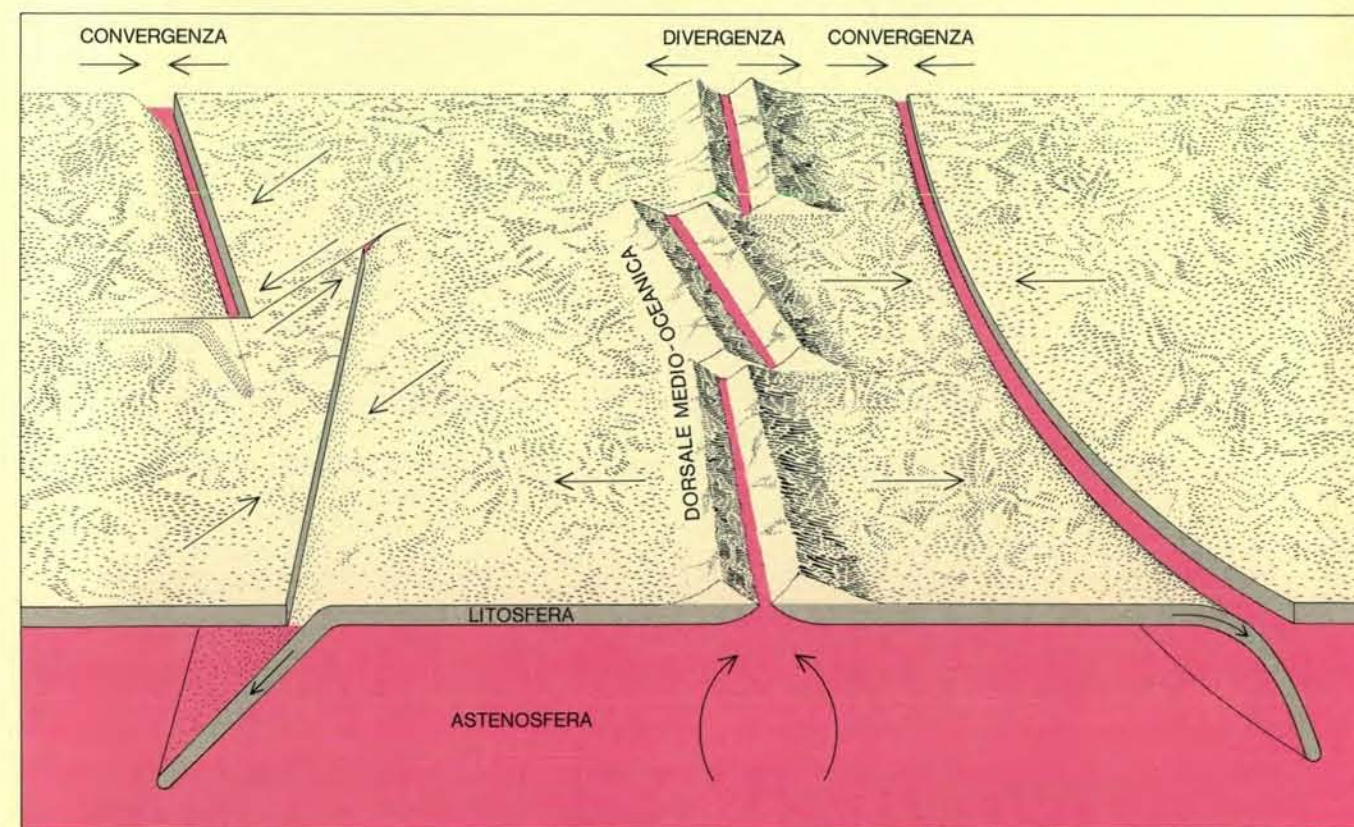
La base del nuovo quadro concet-

Sulla pagina a fronte, il Troodos Massif sull'isola di Cipro, così come appare in una fotografia da satellite ripresa recentemente da un'altitudine di circa 1000 chilometri, con un sistema multispettrale, dall'ERTS I, il primo Earth Resources Technology Satellite. Il Troodos Massif, nel quale sono presenti numerosi giacimenti minerari importanti dal punto di vista economico, si è sviluppato lungo un margine di zolla divergente e, nella fotografia sulla pagina a fronte, corrisponde alla regione montuosa di colore rosso scuro. Si pensa che tale regione sia un frammento di litosfera oceanica che si è formato per espansione dei fondali oceanici lungo una dorsale medio-oceanica sommersa e che solo successivamente sia stato sollevato fino a occupare la posizione attuale.

Un campione di una roccia sedimentaria raccolta durante una perforazione del Deep Sea Drilling Project a circa 550 chilometri a sud est di New York e nel quale è stata scoperta una vena di rame puro. La vena che in questa sezione del campione è individuata dalla struttura brunastra orizzontale, è lunga poco piú di 4 centimetri. Il campione è stato raccolto in una perforazione nei sedimenti del rialzo continentale, su un fondale profondo circa 6000 metri, una ventina di metri sopra il basamento vulcanico.

Un campione metallifero raccolto nell'Atlantis II Deep, una delle sorgenti di soluzioni ad alta concentrazione lungo la valle assiale del mar Rosso, a una profondità di circa 2000 metri al di sotto del livello del mare; questo campione rappresenta il deposito sottomarino a solfuri metallici piú concentrato finora noto. I sedimenti argillosi contenenti i solfuri metallici riempiono i bacini del mar Rosso fino a uno spessore stimato tra i 20 e i 100 metri. I depositi sono saturi di soluzioni ad alta concentrazione, considerate di origine idrotermale, dalle quali i solfuri sarebbero precipitati. La fotografia è di David A. Ross, della Woods Hole Oceanographic Institution.

tuale è la teoria della tettonica a zolle (si veda l'articolo *La tettonica a zolle crostali* di John F. Dewey in « Le Scienze », n. 48, agosto 1972). Il termine tettonica sta a indicare i risultati dei movimenti della crosta terrestre. I movimenti in questione coinvolgono la litosfera, l'involucro rigido piú esterno della Terra, il cui spessore è dell'ordine del centinaio di chilometri. La litosfera, che si comporta come se galleggiasse su uno strato plastico sottostante, l'astenosfera, è frammentata in circa sei zolle principali, ciascuna delle quali ha dimensioni tali da comprendere un continente e parte del bacino oceanico adiacente (*si veda la figura in alto nella pagina a fronte*).

I limiti delle zolle litosferiche sono sottolineati da strette zone sismiche lungo le quali le zolle si muovono l'una rispetto all'altra. Sono stati riconosciuti tre tipi di margini di zolla: il margine convergente dove due zolle, muovendo l'una verso l'altra o entrano in collisione oppure una delle due sprofonda al di sotto dell'altra e viene riassorbita all'interno della Terra; il margine divergente, dove due zolle adiacenti divergono l'una rispetto all'altra, poiché nuova litosfera viene continuamente aggiunta a ciascuna delle due per effetto dell'espansione dei fondali oceanici; la nuova litosfera che si aggiunge piú o meno simmetricamente da un lato e dall'altro del margine divergente agisce piú o meno come un nastro trasportatore che trascina i continenti nel suo movimento allontanandoli l'uno dall'altro in quel moto che è conosciuto col nome di deriva continentale. L'esistenza contemporanea di margini convergenti, ove la litosfera viene distrutta, e di margini divergenti, ove viene creata nuova litosfera, consente al meccanismo di non prevedere alcun mutamento radicale nel diametro della Terra. Il terzo tipo di margine è chiamato margine trasforme ed è quello ove due zolle adiacenti slittano una rispetto all'altra lungo una superficie comune.

La maggior parte dei giacimenti di metalli utili sui continenti è costituita da depositi idrotermali, cioè da giacimenti formatisi per precipitazione da soluzioni. Dal punto di vista economico, i tipi piú importanti di giacimenti idrotermali sono quelli a solfuri. Circa un anno fa, Frederik Sawkins, un geologo dell'Università del Minnesota, ha messo in evidenza che la maggior parte dei depositi a solfuri del mondo si trova lungo attuali o antichi margini convergenti nei quali una zolla litosferica si immerge al di

Le sei zolle principali in cui è suddivisa la litosfera, l'involucro esterno rigido della Terra: ciascuna di esse è limitata da linee continue in colore. Le coppie di frecce indicano se il margine di zolla è convergente oppure se è del tipo divergente.

Due tipi di margine di zolla: convergente e divergente. Le zolle litosferiche, dello spessore di un centinaio di chilometri, si muovono in direzione opposta rispetto alle dorsali medio-oceaniche, dando luogo ai margini divergenti, e sprofondano poi al di sotto delle profonde fosse oceaniche, dando luogo ai margini convergenti. Il margine trasforme non è qui illustrato.

sotto del margine di un continente (che comprende anche la piattaforma continentale) o di un arco insulare. I processi che concentrano i depositi a solfuri lungo margini convergenti sono ancora in parte sconosciuti e implicano l'attività di soluzioni mineralizzanti provenienti dalla zolla litosferica in via di sprofondamento che fonde e viene assorbita all'interno della Terra.

Fra i depositi a solfuri formatisi lungo margini convergenti vi sono anche i giacimenti di Kuroko in Giappone, i giacimenti a solfuri delle Filippine, quelli che si estendono lungo la fascia montuosa del margine occidentale delle due Americhe (dalle Montagne Rocciose, alle Coast Ranges, alle Ande) e quelli che affiorano dal Mediterraneo orientale al Pakistan. I giacimenti auriferi non sono giacimenti a solfuri ma spesso si accompagnano a essi. La maggioranza dei depositi auriferi in Alaska, Canada, USA sudorientali, California, Venezuela, Brasile, Africa occidentale, Rodesia, India meridionale e Australia sud-orientale e occidentale, si presenta in rocce che possono essere associate ad antichi margini convergenti.

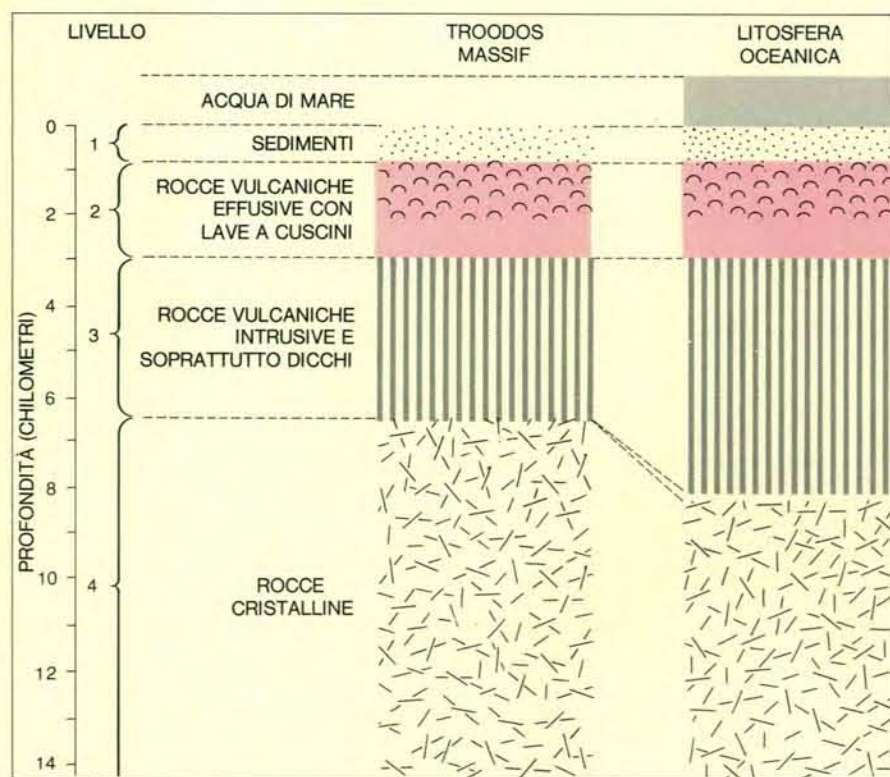
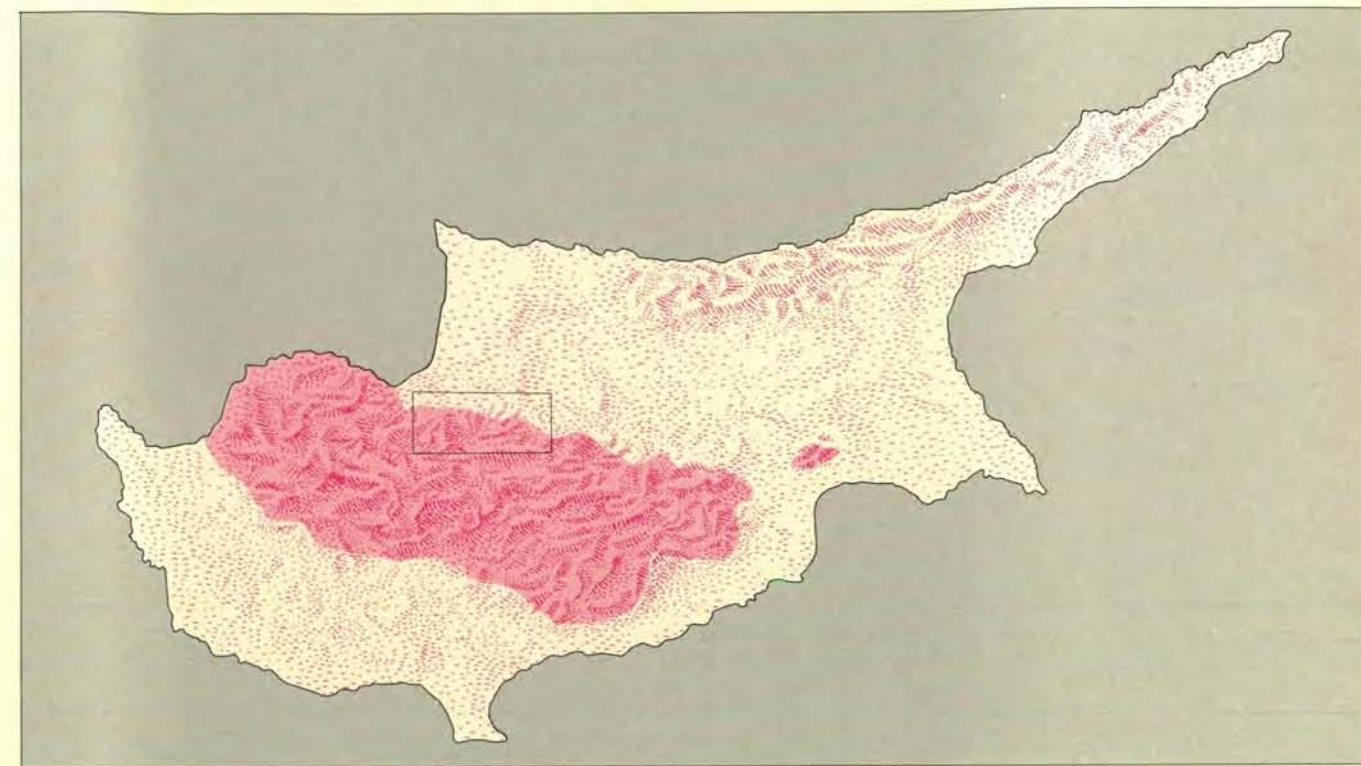
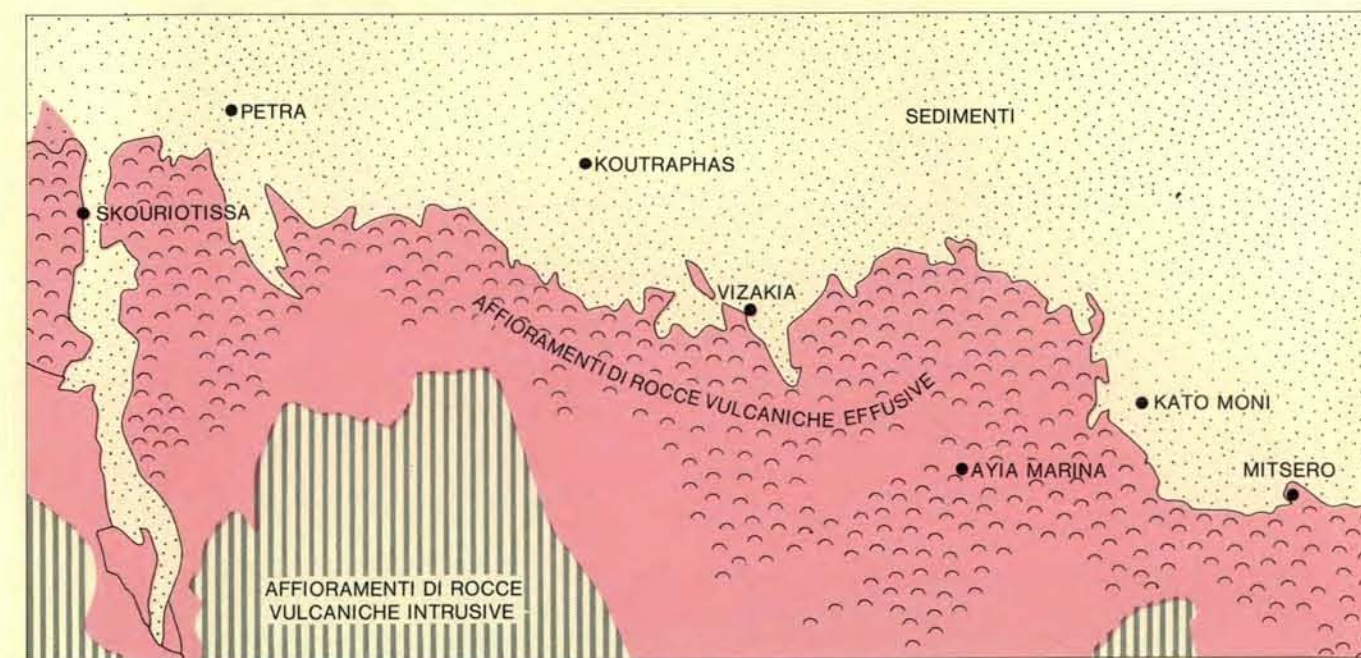
I margini divergenti si formano per l'espansione di zolle litosferiche generalmente nelle zone centrali dei bacini oceanici. Il mar Rosso e Cipro forniscono importanti indizi sul potenziale minerario in solfuri anche di questo tipo di margini di zolla.

Il mar Rosso è il prodotto di un margine divergente che si è sviluppato tra la zolla africana e quella asiatica e costituisce un laboratorio naturale accessibile per lo studio dei processi minerari associati a questo tipo di margine. Circa cinque anni fa, in tre bacini abbastanza piccoli che si allineano alla profondità di circa 2000 metri nella parte centrale del mar Rosso, sono stati trovati i depositi sottomarini piú ricchi di solfuri metallici. I solfuri sono disseminati nei sedimenti che riempiono i bacini fino a uno spessore stimato tra i 20 e i 100 metri. I circa 30 metri piú superficiali che sono stati esplorati attraverso perforazioni compiute nel piú grande dei tre bacini, hanno un contenuto totale in peso a secco di circa 80 milioni di tonnellate, con un contenuto percentuale del 29 % in ferro, del 3,4 % in zinco, 1,3 % in rame, 0,1 % in piombo, 0,005 % in argento e 0,00005 % in oro. I depositi sono saturi di soluzioni ipersaline che contengono gli stessi metalli che sono presenti nei depositi a solfuri. Le soluzioni ipersaline sono considerate soluzioni idrotermali dalle quali sono precipitati i solfuri. È controverso se essi si caricano del loro contenuto in minerali da sorgenti vulcaniche nel mar Rosso o da sedimenti ad alto contenuto in rame, vanadio e zinco adiacenti ai bacini dove si trovano i depositi a solfuri metallici (si veda anche l'articolo *Le acque ipersaline del mar Rosso* di Egon T. Degens e David A. Ross in « Le Scienze », n. 23, luglio 1970).

Il mar Rosso rappresenta il primissimo stadio nello sviluppo di un bacino oceanico, quello nel quale un margine divergente spezza un continente in due parti. Lo stadio piú avanzato di sviluppo di un margine divergente è il sistema di dorsali medio-oceaniche, una catena montuosa sottomarina lunga oltre 70 000 chilometri che si estende attraverso tutti i bacini oceanici attorno al globo. Il sistema di dorsali medio-oceaniche non è stato ancora studiato abbastanza da determinare se siano, lungo la sua cresta o in bacini posti sui suoi versanti, presenti o meno concentrazioni di solfuri metallici paragonabili a quelle dei depositi del mar Rosso. Misure della distribuzione del flusso di calore sulle dorsali e della alterazione chimica delle rocce di cresta indicano che l'acqua del mare forma una soluzione idrotermale penetrando nelle fessure e dissolvendo i minerali delle rocce ivi presenti per precipitarli poi in depositi concentrati.

Qualche operazione di campionamento ha indicato che processi idrotermali stanno concentrando attivamente metalli provenienti da sorgenti vulcaniche connesse con il sistema di dorsali. I sedimenti posti su dorsali medio-oceaniche attive sono generalmente arricchiti in ferro, manganese, rame, nichel, piombo, cromo, cobalto, uranio e mercurio con percentuali in traccia di vanadio, cadmio e bismuto. Le concentrazioni tipiche di sedimenti che coprono estese superfici sulle dorsali medio-oceaniche non hanno interesse economico ma, localmente, esistono concentrazioni molto piú elevate.

In rocce dragate sulla Dorsale dell'Oceano Indiano sono stati trovati solfuri metallici. Inoltre, il programma di perforazioni in mare profondo, noto col nome di Deep Sea Drilling Project, ha messo in luce, in diversi pozzi, piccole vene di rame puro. Per esempio, lungo la cresta della Dorsale 90 Est, presso l'Equatore, nell'oceano Indiano, sono state trovate vene di rame in rocce vulcaniche ricoperte da circa 500 metri di sedimenti e sotto un battente d'acqua di 2200 metri. Circa a 550 chilometri a sud-est di New York sono stati scoperti in sedimenti posti una ventina di metri al di sopra del basamento vulcanico, sotto uno spessore d'acqua di quasi 6000 metri, una piccola vena di rame puro e aggregati di cristalli dello stesso metallo (*si veda la figura in alto a pagina 56*).

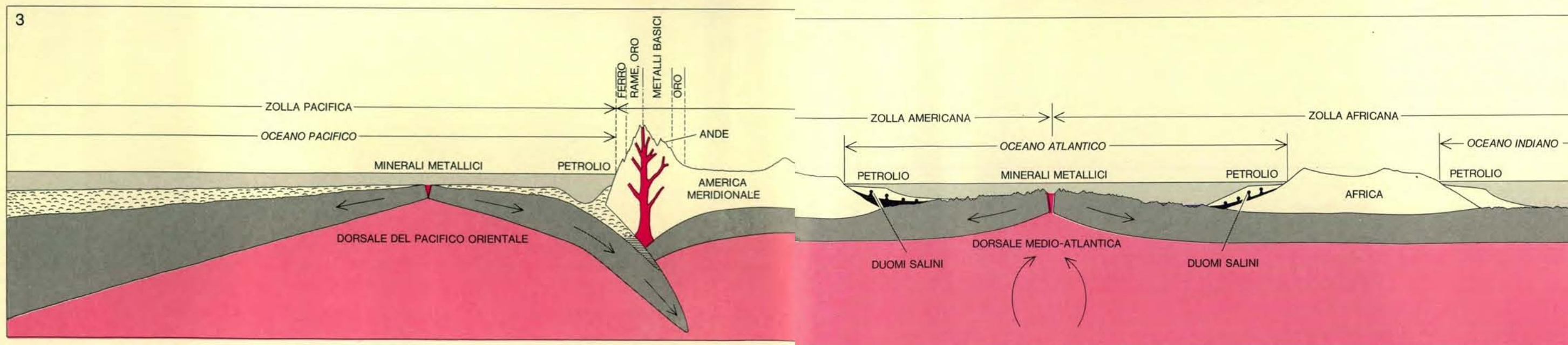
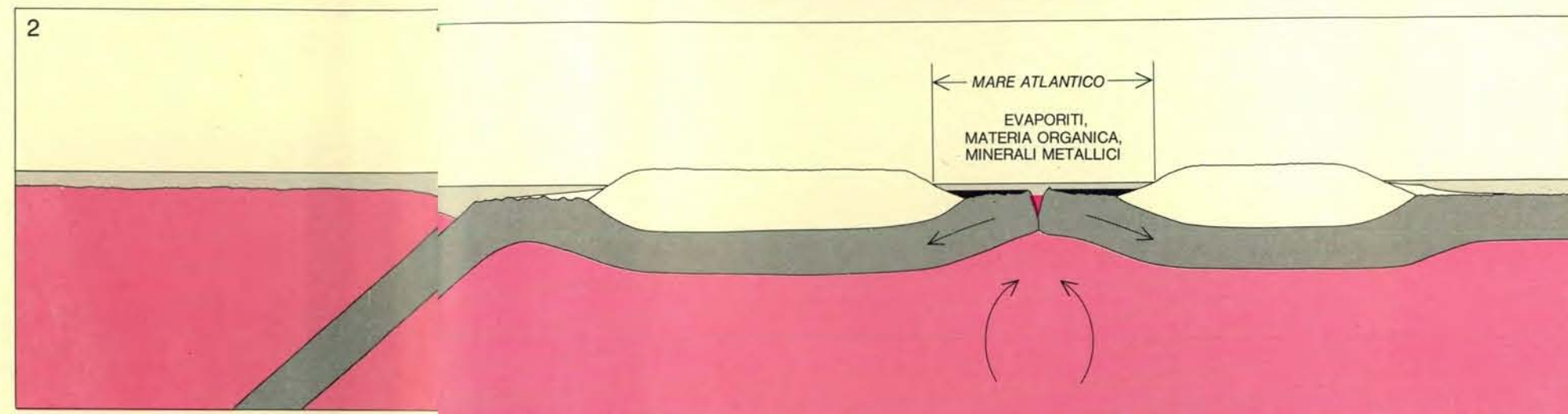
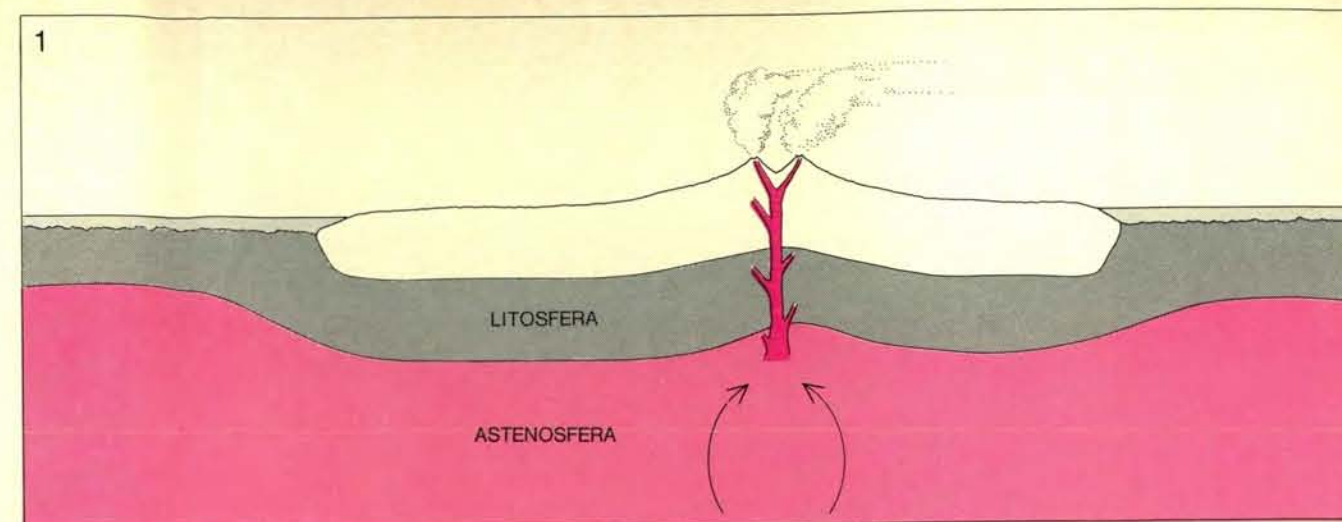
Particolare significato riveste un campione di manganese lungo poco piú di 4 centimetri recentemente dragato alla profondità di circa 4000 metri nella valle mediana della Dorsale Medio-Atlantica durante la Trans-Atlantic Geotraverse della National

Confronto tra la sequenza di rocce affioranti nel Troodos Massif (*a sinistra*) e la successione tipica della litosfera oceanica (*a destra*); l'analogia delle due successioni è evidente. La struttura geologica del Troodos Massif è stata determinata direttamente sul terreno, mentre quella della litosfera oceanica è stata individuata attraverso le tecniche della sismica a rifrazione. I giacimenti a solfuri del Troodos Massif si trovano nella parte superiore dello strato costituito da rocce vulcaniche effusive. La struttura a cuscini è caratteristica delle lave fuoriuscite e depostesi in ambiente subacqueo.

L'isola di Cipro, famosa per la sua ricchezza di minerali fin dai tempi dei Fenici. I principali giacimenti si trovano nella parte superiore dei livelli vulcanici del Troodos Massif, la cui ampiezza totale è indicata in colore intenso. La zona tratteggiata è coperta da sedimenti. Il rettangolo racchiude la zona della quale è riportata una carta geologica nella figura qui sotto.

Carta geologica della zona racchiusa nel rettangolo nella figura sopra; è basata su studi compiuti dal Servizio Geologico di Cipro. La carta mostra affioramenti di rocce vulcaniche che comprendono anche giacimenti di solfuri metallici.

Oceanic and Atmospheric Administration. La composizione, forma e spessore di questo campione di manganese, che si è accumulato a una velocità circa 100 volte superiore a quella dei noduli di manganese, indicano un'origine idrotermale e dimostrano che nei bacini oceanici presso alcuni margini divergenti si stanno attivamente accumulando depositi idrotermali. Dato che si suppone che il fondo oceanico si formi per espansione a partire dalla dorsale medio-oceanica, un deposito minerario che si trovi su di essa, se il processo genetico è di tipo continuo, dovrebbe estendersi lungo una fascia che inizia nella dorsale e termina con il margine continentale adiacente (*si veda la figura a pagina 62*).

Al punto in cui è ancora l'esplorazione degli oceani, sembrerebbe impossibile poter disporre di osservazioni dettagliate su depositi economicamente importanti di solfuri metallici originatisi presso un margine divergente lungo una dorsale medio-oceanica sommersa. Invece, un deposito di questo tipo è noto ed è stato ampiamente studiato. Il Troodos Massif sull'isola di Cipro è ritenuto un frammento di litosfera oceanica formatosi per espansione del fondo oceanico da una dorsale sommersa e successivamente sollevato fino a occupare la posizione attuale (*si veda la figura a pagina 55*). La composizione e la sequenza stratificata di rocce che costituiscono il Troodos Massif sono dello stesso tipo noto sui fondi oceanici (*si veda la figura a pagina 58*).

Cipro è da lungo tempo conosciuta per la sua ricchezza di minerali. La estrazione del rame, dal quale l'isola prende nome, era un'industria importante ai tempi dei Romani e addirittura dei Fenici. Le chiazze di un bel verde brillante di solfuri di rame, visibili sulle discariche delle antiche miniere, hanno attratto i moderni prospettori minerari. Tra il 1965 e il 1970 l'esportazione media annuale di Cipro era di circa un milione di tonnellate sia per la pirite sia per la cromite e il gesso, era di circa 150 mila tonnellate per la calcopirite e di 100 mila tonnellate per i concentrati di rame. Il valore stimato della produzione mineraria esportata da Cipro ammontava nel 1970 a 30 milioni di dollari.

I principali giacimenti si trovano negli strati vulcanici piú elevati del Troodos Massif. Non si sa se i depositi di solfuri abbiano avuto origine prima del sollevamento del Troodos Massif o dopo. Nel primo caso, i giacimenti sarebbero rappresentativi di una situazione possibile sui fondi oceanici. Nel secondo, invece, sarebbero da attribuirsi a condizioni particolari che nulla hanno a che vedere con i fondali oceanici. I depositi a solfuri sono chiaramente correlati con le rocce vulcaniche nelle quali essi compaiono. Studi recenti rivelano che sedimenti ricchi di ferro e di manganese intercalati con le rocce vulcaniche e associati con giacimenti del Troodos Massif sono identici dal punto di vista chimico con quei sedimenti metalliferi rinvenuti su dorsali medio-oceaniche attive; ciò indica che i sedimenti e i giacimenti si sono formati sul fondo oceanico per l'intervento di processi idrotermali.

I giacimenti del Troodos possono fornire la prima prova solida sulla natura dei depositi a solfuri metallici nei

Qui e sulla pagina a fronte (*dall'alto in basso*) è esemplificato, attraverso una serie di sezioni dello sviluppo dell'Atlantico meridionale, il ruolo dei margini di zolla nell'accumulo di giacimenti minerari. In questa serie di schemi la posizione dell'Africa è stata supposta stazionaria. Nello stadio *1*, il continente unico chiamato Pangea si spezza in due continenti (America meridionale e Africa) lungo un margine divergente. Nello stadio *2*, la crosta oceanica generata attraverso il processo di espansione dei fondali oceanici, lungo un margine di zolla divergente (un predecessore della Dorsale Medio-Atlantica) trascina l'America meridionale verso ovest; la generazione di nuova crosta è compensata dalla distruzione di crosta lungo una fossa (un margine convergente) che si sviluppa a occidente dell'America meridionale. Nell'Atlantico, durante queste prime fasi della deriva, si depositano spessi strati di evaporiti, di materia organica e di minerali metallici. Nello stadio *3*, la continua espansione dei fondali, derivata dall'attività della dorsale medio-oceanica, provoca il graduale sviluppo dell'oceano Atlantico, trascina l'America meridionale ancor piú verso ovest fino a sovrascorrere alla fossa, della quale provoca l'inversione di inclinazione; come conseguenza della deformazione determinatasi lungo il margine convergente del bordo occidentale dell'America meridionale, si sviluppa la catena delle Ande. Attraverso gli strati crostali sovrastanti, si spingono i minerali metallici che vengono fusi e concentrati, mentre la zolla pacifica sprofonda al di sotto della massa continentale sud-americana. Attorno alla dorsale medio-oceanica continuano, nell'Atlantico, ad accumularsi minerali metallici. I depositi evaporitici, sepolti al di sotto di ingenti spessori di sedimenti lungo i margini continentali, formano, per diapirismo, grandi duomi salini che fungono da trappole per petrolio e gas che si sono sviluppati dalla materia organica accumulatasi nell'antico mare Atlantico.

bacini oceanici. Per esempio, il giacimento di Skouriotissa è approssimativamente ellittico in pianta e misura all'incirca 600 metri per 200; in sezione trasversale è lentiforme e si stima che la sua massa sia di 6 milioni di tonnellate. La composizione media del giacimento è del 2,25 % in rame (arrivando talora anche a superare il 5 %), del 48 % in zolfo e del 43 % in ferro.

Anche il giacimento di Mavrovouni è ellittico in pianta, è lungo circa 300 metri e largo poco meno di 200 e forma una lente che raggiunge i 250 metri in sezione trasversale. Si stima che la sua massa sia superiore ai 15 milioni di tonnellate. La sua composizione media è del 4,2 % in rame, 48 % in zolfo, 43 % in ferro, 0,4 % in zinco; contiene inoltre 7,8 grammi per tonnellata d'oro e un'identica quantità d'argento.

I sedimenti associati al giacimento di Skouriotissa, presumibilmente costituiti da prodotti di alterazione della pirite presente nel giacimento, contengono 60,1 grammi d'oro per tonnellata e 373 grammi d'argento per tonnellata. La presenza di vasti accumuli di ossidi metallici indica che, al di sotto della superficie montuosa del Troodos Massif, sono presenti altri giacimenti minerari. Il giacimento di Skouriotissa è coltivato in sotterranea mentre quello di Mavrovouni è a cielo aperto.

C'è da chiedersi che ne sarebbe di un giacimento come quello del Troodos Massif se questo fosse sommerso al di sotto di migliaia di metri d'acqua sulla cresta o sui versanti di una dorsale medio-oceanica. Probabilmente nessun metodo attuale di esplorazione sarebbe in grado di individuarlo: la risoluzione dei metodi di prospezione geofisica deve essere migliorata al fine di individuare questo tipo di giacimento minerario al di sotto del mare. Sia i metodi di esplorazione sia le tecniche di coltivazione saranno comunque assai costose.

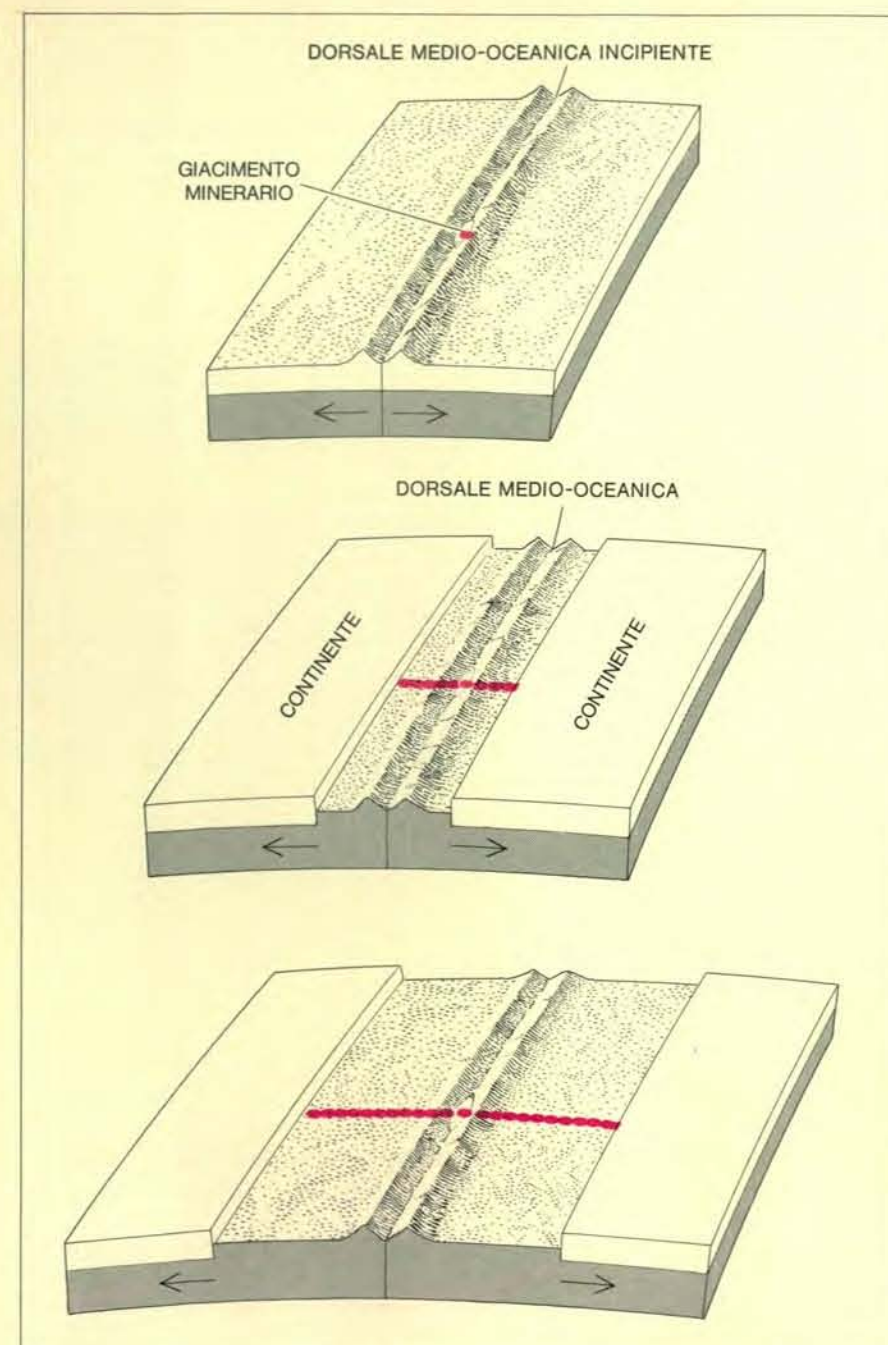
I requisiti necessari perché si accumuli un giacimento di petrolio sono: l'esistenza di una fonte di materia organica che possa dar luogo agli idrocarburi; un serbatoio naturale atto a contenerli; una trappola in cui idrocarburi liquidi e gassosi possano concentrarsi. Il petrolio è un insieme di idrocarburi derivati da resti di piante e animali; per poter dar luogo al petrolio, però, la materia organica deve accumularsi in un ambiente che ne consenta la conservazione; quest'ultimo fenomeno è favorito da un ambiente che è tossico per gli organismi viventi (in tal modo la materia organica non viene utilizzata per l'alimentazione) e carente di ossigeno (cosí che la materia organica non viene ossidata). A questo punto ci si può chiedere in che modo condizioni favorevoli all'accumulo di petrolio possano essere connesse con zolle convergenti o divergenti.

I margini convergenti lungo i quali la parte oceanica di una zolla litosferica si immerge al di sotto di un margine continentale, sono caratterizzati dalla presenza di una profonda fossa che corre per buona parte della loro lunghezza. Lungo tutto il margine continentale delle due Americhe, dove la litosfera del Pacifico sprofonda al di sotto del continente, si sviluppa un sistema di profonde fosse oceaniche. Oltre alle fosse oceaniche, lungo alcuni margini convergenti, compaiono festoni di archi insulari, posti tra la fossa e il continente. Lungo il margine occidentale del Pacifico vi sono numerosi archi insulari, fra i quali quello delle Aleutine, quello delle Kurili, quello del Giappone, delle Ryu Kyu, delle Filippine e dell'Indonesia; archi simili sono quelli delle Marianne, delle Sandwich meridionali e delle Indie occidentali. Gli archi insulari dividono un oceano in bacini piú piccoli parzialmente chiusi tra le isole e il continente adiacente. Bacini di questo tipo sono il mar di Bering, quello di Okhotsk, quello del Giappone, il mar Giallo, il mar della Cina orientale e il mar della Cina meridionale.

Sia le fosse marginali, sia gli archi insulari determinano un ambiente che è favorevole da diversi punti di vista all'accumulo di petrolio: primo, fosse e archi insulari si comportano come barriere che catturano sedimenti e materia organica provenienti sia dal continente sia dal bacino oceanico; secondo, la forma delle fosse e dei piccoli bacini oceanici determinano un rallentamento e una deviazione della circolazione oceanica tali per cui esistono luoghi nei quali il ricambio di ossigeno è modesto e la materia organica depositata può conservarsi; terzo, l'accumulo di sedimenti e le strutture geologiche che si sviluppano in conseguenza della deformazione dei sedimenti per azione di forze tettoniche, forniscono serbatoi e trappole per l'accumulo di petrolio. Secondo Hollis D. Hedberg della Princeton University, questi bacini marginali semichiusi costituiscono alcune delle aree piú promettenti per l'accumulo di petrolio.

Anche lo sviluppo di margini divergenti potrebbe creare un ambiente favorevole all'accumulo di petrolio: se questo fosse confermato, si aprirebbero immense possibilità alla ricerca di petrolio anche nei bacini oceanici profondi. Quando al di sotto di un continente si sviluppa un margine divergente, il continente stesso viene spezzato in due porzioni che vengono fra loro allontanate dall'attività di quella specie di nastro trasportatore che è la generazione continua di nuova litosfera lungo la linea di separazione. All'atto in cui i due frammenti continentali si allontanano, si apre fra essi un nuovo bacino marino. Le aree continentali circostanti si comportano come imponenti barriere che restringono l'ampiezza della circolazione delle acque: ne risulta che la materia organica può conservarsi e che, se l'evaporazione è superiore all'afflusso, insieme con la materia organica possono depositarsi strati evaporitici. Mentre i frammenti continentali continuano ad allontanarsi e il bacino marino a spronfondare, quest'ultimo si trasforma piano piano in un vero e proprio oceano. Gli strati di materia organica e di evaporiti vengono sepolti sotto imponenti accumuli sedimentari. Successivamente la materia organica si trasforma in petrolio con un meccanismo che non è ancora interamente chiarito, e gli strati evaporitici si deformano in masse diapiriche a forma di duomo che costituiscono delle trappole per l'accumulo del petrolio.

Il mar Rosso è un esempio di mare ristretto formatosi in una prima fase dello sviluppo di un margine divergente tra le masse continentali arabica e africana. Sui suoi fondali sono stati rinvenuti fanghi organici e accumuli di evaporiti dello spessore di oltre 5000 metri. Lungo i margini orientale e occidentale sia dell'Atlantico settentrionale sia di quello meridionale sono state scoperte strutture che hanno tutto l'aspetto di duomi salini e che si estendono dalle piattaforme continen-

DORSALE MEDIO-OCEANICA INCIPIENTE
GIACIMENTO MINERARIO
DORSALE MEDIO-OCEANICA
CONTINENTE
CONTINENTE

Sviluppo teorico di un deposito minerario lungo un margine divergente. Un deposito minerario di tipo idrotermale (*in colore*) che si formi per l'attività di una sorgente di soluzioni ad alta concentrazione posta lungo l'asse di una dorsale medio-oceanica in espansione, dovrebbe dar luogo a una zona mineralizzata lineare che dalla dorsale si estende fino ai margini continentali adiacenti. Questo avverrebbe, ammesso che la sorgente sia costante, come conseguenza dell'espansione dei fondali oceanici.

AMERICA SETTENTRIONALE
MARE ATLANTICO
EUROPA
AFRICA
AMERICA MERIDIONALE

L'Oceano Atlantico agli inizi della deriva dei continenti era un mare ristretto la cui circolazione era limitata dalla presenza dei continenti circostanti. Come nell'attuale mar Rosso, anche nello stretto mare Atlantico, vigevano condizioni che favorivano la conservazione della materia organica e la deposizione di evaporiti, premesse essenziali alla formazione di accumuli petroliferi che si troverebbero lungo i margini continentali.

B di N

TUTTE LE OPERAZIONI
E I SERVIZI DI BANCA
Credito Agrario
Credito Fondiario
Credito Industriale
e all'Artigianato
Monte di Credito su Pegno
Servizi di Ricevitorie
Esattorie e Tesorerie

- Direzione Generale in Napoli
- Rappresentanza della Direzione Generale in Roma
- 498 Filiali in Italia

- Filiali all'estero: Buenos Aires - New York
- Rappresentanze all'estero: Bruxelles - Buenos Aires - Francoforte s/M Londra - New York - Parigi - Zurigo
- Banca affiliata: BANCO DI NAPOLI (Ethiopia) Share Co. Asmara
- Ufficio cambio permanente a bordo della t/n «Raffaello»

- CORRISPONDENTI IN TUTTO IL MONDO

BANCO
DI
NAPOLI

ISTITUTO DI CREDITO DI DIRITTO PUBBLICO
FONDATO NEL 1539
Fondi patrimoniali e riserve: L. 99.754.952.734

tali fino ai rialzi continentali in fondali profondi piú di 5000 metri. La presenza di questi duomi salini nell'Atlantico profondo indica che, in una prima fase della deriva dei continenti, l'Atlantico era un mare la cui circolazione era limitata dai continenti adiacenti (*si veda la figura a pagina 63*).

Come nell'attuale mar Rosso, le condizioni vigenti allora nel « mare Atlantico » hanno favorito la conservazione di materia organica e la deposizione di evaporiti. In conseguenza della creazione simmetrica di nuova litosfera per espansione dei fondali oceanici lungo la Dorsale Medio-Atlantica, il mare Atlantico si estese via via divenendo un oceano e sui suoi fondali materia organica ed evaporiti furono sepolte sotto grandi masse di sedimenti che attualmente si trovano lungo i margini dell'oceano Atlantico. È ragionevole attendersi che gli accumuli di petrolio si estendano verso il mare aperto al di sotto della piattaforma continentale, della scarpata e dell'adiacente rialzo continentale, fino a profondità di circa 6000 metri, su vaste aree dei margini orientale e occidentale dell'Atlantico sia settentrionale sia meridionale. Allo stesso modo, il petrolio può essere rinvenuto in altri bacini oceanici che si sono sviluppati attraverso lo stadio di bacino piccolo e chiuso per espansione dei fondali oceanici.

In breve, l'andamento della distribuzione dei minerali che affiora dal quadro concettuale derivato dalla nuova tettonica globale, aiuterà certamente l'uomo nella ricerca di nuovi giacimenti. I processi idrotermali hanno concentrato la maggior parte dei depositi minerari a solfuri lungo margini di zolla convergenti, in origine presso margini continentali. I processi idrotermali sono però attivi anche presso margini divergenti.

Per ciò che concerne il petrolio, i margini convergenti creano condizioni adatte all'accumulo in piccoli bacini oceanici e nelle fosse adiacenti ai continenti. Anche i margini divergenti, d'altro canto, creano condizioni favorevoli allo sviluppo di giacimenti petroliferi che si estendono dalla piattaforma continentale fino al rialzo continentale, nell'oceano profondo.

In conclusione, l'andamento globale della distribuzione dei giacimenti minerari cosí come affiora dal modello della tettonica a zolle, probabilmente servirà ad accelerare la scoperta di risorse nuove non solo sui fondi marini ma anche sui continenti.

Il sistema immunitario

Ha il compito di salvaguardare l'identità del corpo. I suoi costituenti di base sono i linfociti e gli anticorpi, molecole che riconoscono sia le molecole estranee sia quelle appartenenti allo stesso organismo

di Niels Kaj Jerne

Il sistema immunitario è paragonabile nella complessità delle sue funzioni al sistema nervoso. Ambedue sono organi diffusi, dispersi in mezzo alla maggior parte dei tessuti corporei. Nell'uomo, il sistema immunitario pesa circa 1 kg e consiste di circa un trilione di cellule (10^{12}) chiamate linfociti e di circa 100 milioni di trilioni di molecole (10^{20}), chiamate anticorpi e prodotte e secrete dai linfociti. La peculiare capacità del sistema immunitario consiste nel riconoscere una certa configurazione e il suo compito nel fare la guardia all'organismo e nel salvaguardare l'identità.

Le cellule e le molecole del sistema immunitario raggiungono i tessuti con la circolazione sanguigna, attraversano le pareti dei capillari e, dopo una breve sosta, percorrono un sistema vascolare di ritorno loro proprio, il sistema linfatico.

L'albero dei vasi linfatici raccoglie linfociti e anticorpi, assieme ad altre cellule e molecole e al liquido interstiziale che bagna tutti i tessuti corporei e riversa di nuovo il suo contenuto nella circolazione sanguigna, unendosi alle vene succlavie poste dietro la clavicola. I linfociti si trovano in elevate concentrazioni nei linfonodi, stazioni situate lungo i vasi linfatici, e nelle sedi dove sono prodotti e elaborati: il midollo osseo, il timo e la milza.

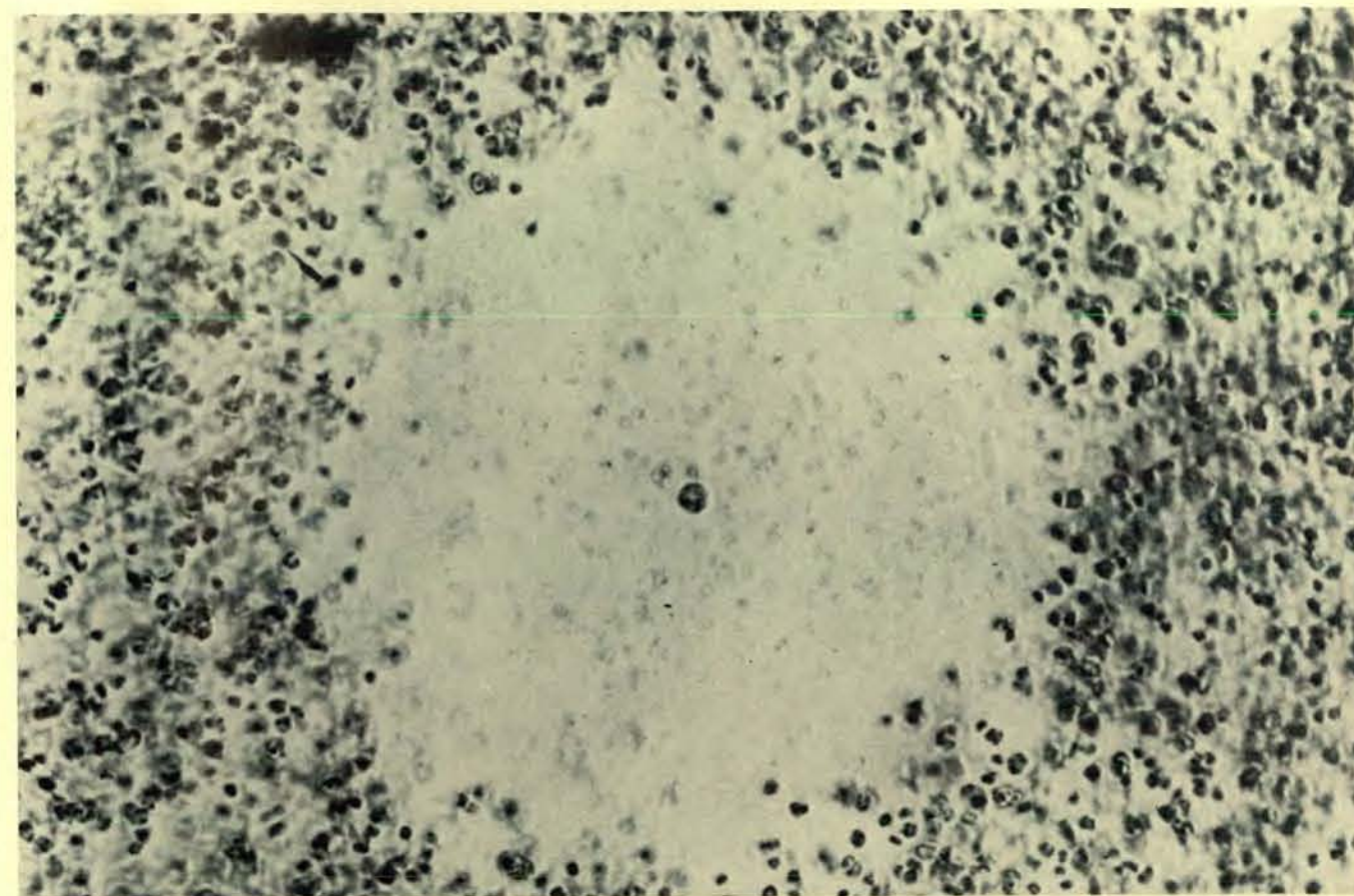
Il sistema immunitario continuamente decade e si rinnova. Nei pochi istanti che vi sono stati necessari per leggere fin qui, il vostro corpo ha già prodotto 10 milioni di nuovi linfociti e un milione di miliardi di nuove molecole di anticorpi. Ciò potrebbe anche non essere così sbalorditivo se tutte queste molecole di anticorpi fossero uguali, ma in realtà non lo sono . Sono necessari milioni di molecole diverse per poter assolvere il compito di riconoscere delle configurazioni, così come sono necessari milioni di chiavi diverse per milioni di differenti serrature.

Le configurazioni specifiche riconosciute dalle molecole di anticorpi sono gli epitopi, speciali aree sulla superficie di macromolecole quali, per esempio, le proteine, i polisaccaridi, gli acidi nucleici. Le molecole che mostrano di possedere epitopi sono chiamate antigeni: è ben difficile trovare una grossa molecola che non sia un antigene. Prenderemo in considerazione le molecole proteiche, che includono gli enzimi, gli ormoni, le molecole adibite al trasporto come l'emoglobina, e la grande varietà di molecole incorporate nelle membrane cellulari o che formano il rivestimento esterno di virus e batteri.

Tutte le innumerevoli molecole proteiche sono costituite da catene polipeptidiche: filamenti lineari di alcune centinaia di amminoacidi, scelti fra una ventina di amminoacidi diversi. Il numero di queste unità in una grossa molecola proteica equivale al numero di lettere presenti nella colonna di testo che state leggendo e che è una serie lineare di lettere, scelte da un alfabeto di 21 lettere. Diverse molecole proteiche hanno differenti sequenze amminoacidiche, così come diversi testi hanno differenti sequenze di lettere. La serie di lettere in questa colonna di testo è stata accuratamente « ripiegata » in linee successive. Le catene polipeptidiche di una molecola proteica sono esse pure ripiegate, anche se non così regolarmente. La loro struttura assomiglia piuttosto a ciò che otterreste comprimendo a caso tra le mani qualche metro di corda. Questo non è, tuttavia, il caso del ripiegamento di una particolare catena polipeptidica: esso, e quindi anche la definitiva conformazione della molecola proteica, è dettato inequivocabilmente dalla sequenza degli amminoacidi.

Le porzioni delle catene ripiegate che rimangono alle superficie di una molecola proteica ne determinano il rilievo superficiale. Un epitopo (o determinante antigenico) è una zona molto piccola di questa superficie: possono contribuire alla sua configurazione circa 10 amminoacidi. Come ha dimostrato per diverse molecole di citocromo *c*, E. Margoliash degli Abbott Laboratories e, inoltre, A. Nisonoff del Collegio di medicina dell'Università dell'Illinois, la sostituzione di un solo amminoacido in una catena polipeptidica di una proteina fa comparire un diverso epitopo. Il sistema immunitario riconosce questa differenza ed è in grado di individuare cellule mutanti che compiono errori nella sintesi proteica. Non solo il sistema immunitario di un individuo può riconoscere gli epitopi su qualsiasi proteina o antigene di altro genere, prodotto da non importa quale fra milioni di specie animali, vegetali e microbiche, ma può anche distinguere gli epitopi estranei da quelli che appartengono alle molecole dell'organismo stesso di cui fa parte. Questo riconoscimento è un evento cruciale, poiché le molecole degli anticorpi si attaccano agli epitopi che riconoscono e quindi condannano gli antigeni (o le cellule che li portano) alla distruzione o alla rimozione con altri meccanismi di cui il corpo dispone.

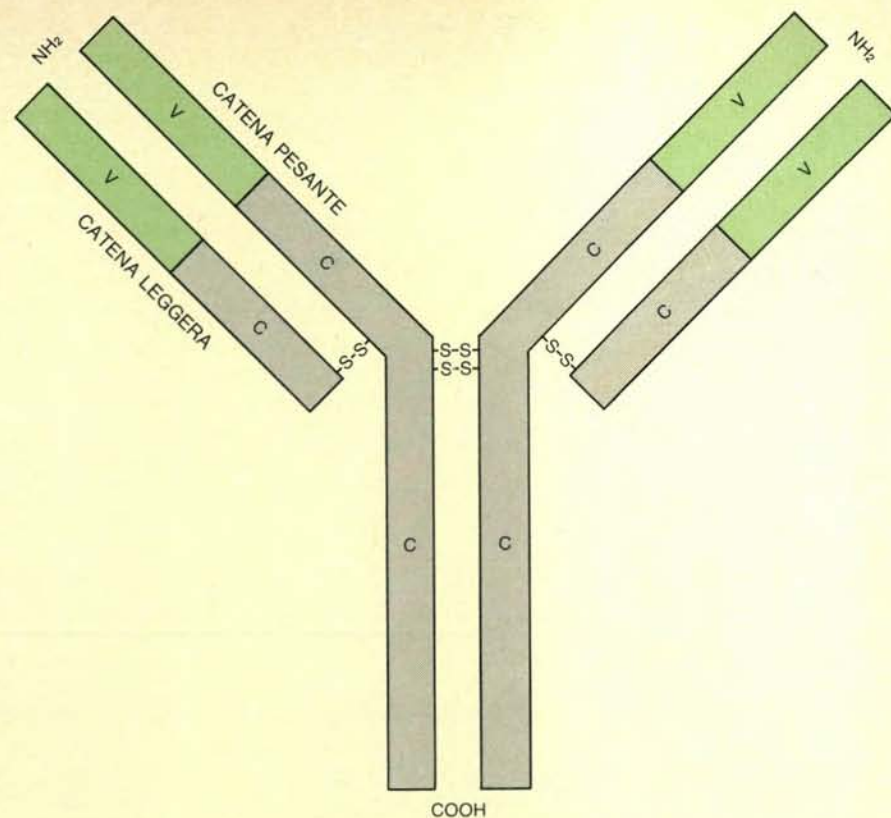
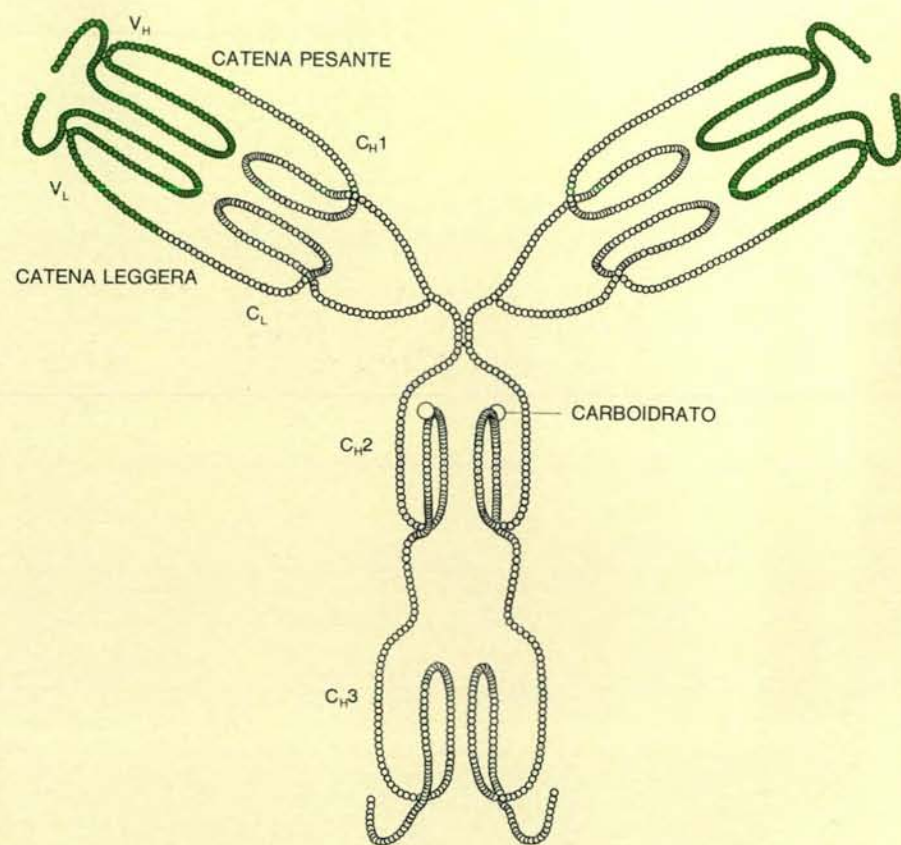
Gli epitopi sono riconosciuti dai siti di combinazione delle molecole degli anticorpi. Un anticorpo è esso pure una molecola proteica formata da più di 20 000 atomi ed è costituito da quattro catene polipeptidiche: due catene leggere identiche e due catene pesanti, pure identiche tra loro. Una catena leggera è formata da 214 amminoacidi, una pesante da circa il doppio. Le molecole degli anticorpi sono uguali tranne che per gli amminoacidi situati in una cinquantina di posizioni « variabili » tra le prime 110 posizioni che costituiscono la cosidetta regione variabile sia delle catene leggere, sia delle catene pesanti. All'estremità di ogni regione variabile esiste un sito di combinazione concavo, il cui rilievo tridimensionale permette di riconoscere un epitopo complementare e di far aderire la molecola dell'anticorpo alla molecola che presenta quell'epitopo. Il fatto che un determinato sito di combinazione riconosca un epitopo piuttosto di un altro dipende da quali amminoacidi si trovano nelle posizioni variabili. Se in ognuna delle 50 posizioni di ambedue i tipi di catene fosse possibile una scelta indipendente, anche soltanto tra due amminoacidi, vi sarebbero 2^{100} (o 10^{30}) molecole potenzialmente diverse! Ma la situazione non è così semplice. Le catene si riuniscono in sottogruppi, in ognuno dei quali vi sono molto meno di 50 posizioni variabili. D'altra parte, in alcune di queste posizioni variabili, riunite nei cosidetti « punti caldi », la scelta avviene tra più di due amminoacidi in alternativa. Viene generalmente ammesso che, nella sequenza di amminoacidi, le diversità riscontrabili tra le molecole di anticorpi derivino da mutazioni verificatesi in geni che codificano per la struttura dell'anticorpo.

Si potrebbe pensare, essendo il vaiolo quella pericolosa malattia che è, che la natura abbia ideato molecole di anticorpi con siti di combinazione in grado di riconoscere in maniera specifica gli epitopi del virus che ne è responsabile. Ma la natura si differenzia dalla tecnologia nel modo come affronta la risoluzione di un certo problema: per esempio non si preoccupa dello spreco (piuttosto di aumentare la probabilità che uno spermatozoo incontri una cellula uovo, la natura trova più semplice produrre milioni di spermatozoi). Invece di ideare molecole di anticorpi per contrapporsi al virus del vaiolo e ad altri agenti nocivi, trova più semplice produrre milioni di diverse molecole di anticorpi, alcune delle quali possono assolvere questo compito. Per analogia, supponiamo che qualche ditta confezioni guanti in mille forme e dimensioni diverse: sarebbe certo in grado di fornire un guanto sufficientemente comodo per qualsiasi mano. Immaginiamo ora che la forma delle mani sia ancora più variabile di quella dei guanti, per esempio la lunghezza delle dita sia compresa tra 2,5 e 15 cm. Confezionando, diciamo, dieci milioni di guanti di forma diversa, il fabbricante potrebbe comunque calzare ogni mano, ma naturalmente a spese dell'efficienza poiché la maggior parte dei guanti non potrebbe mai trovare un compratore capace di calzarli. Ora pensiamo a uno spreco ancora maggiore. Immaginiamo una fabbrica con macchine capaci di produrre un miliardo di forme diverse di guanti; ma con il 99 per cento delle macchine ferme per cui la fabbrica produce in realtà soltanto 10 milioni di guanti a caso, rispetto al potenziale miliardo di forme di guanti. Tutto andrebbe ancora bene. Altrettanto si potrebbe dire per un'altra fabbrica analoga. Anche se le due partite di guanti che i proprietari delle fabbriche immettono sul mercato mostrano di essere identiche soltanto per l'1 per cento, ogni partita è in grado di rispondere bene alle esigenze della clientela.

L'effetto di un anticorpo su un antigene viene illustrato in maniera drammatica in questa micrografia eseguita dall'autore e da A. Nordin. La cellula al centro è una plasmacellula, un linfocita secernente anticorpi del sistema immunitario. È stata inclusa in uno strato di terreno colturale assieme a milioni di globuli rossi di pecora. È una di quelle plasmacellule che sintetizzano anticorpi contro le cellule della pecora, in maniera specifica contro gli epitopi che sono situati sulle molecole della membrana superficiale delle cellule. Gli anticorpi secreti dalla plasmacellula hanno distrutto i globuli rossi nell'area in cui si sono diffusi: il raggio di tale area è di circa 0,2 mm. È questa una tecnica standard per misurare la risposta immunitaria.

Questo è il modo secondo cui alcuni di noi pensano che anche il sistema immunitario risolva il problema del riconoscimento. Con una sostituzione più o meno casuale di amminoacidi nei punti caldi delle regioni variabili delle catene polipeptidiche che costituiscono gli anticorpi, viene prodotta una serie di milioni di molecole di anticorpi con diversi siti di combinazione, che si adatteranno bene praticamente a ogni epitopo. Come è stato dimostrato da J. Oudin dell'Istituto Pasteur e da A. Kelus e P. G. H. Gell dell'Università di Birmingham, nei conigli, e da B. A. Askonas, A. Williamson, B. Wright e W. Kreth del National Institute for Medical Research di Londra nei topi, i singoli animali fanno uso di serie di anticorpi interamente diversi, capaci di riconoscere un dato epitopo.

Vi è una sola seria difficoltà in tutto questo e a essa ho alluso prima: non sembra che il sistema immunitario di un organismo riconosca gli epitopi situati sulle molecole e sulle cellule che fanno parte integrante di quell'organismo. Questa proprietà, che Sir M. Burnet ha chiamato discriminazione tra l'io e il non io, viene spesso definita come « autotolleranza ». Si potrebbe pensare che quest'autotolleranza derivi dall'essere la natura sufficientemente saggia da fabbricare i geni che codificano, per esempio, per i vostri anticorpi in modo tale da non dare origine a siti di combinazione che si adatterebbero a epitopi presenti nel corpo stesso. Tuttavia è facile dimostrare che non è così. Per esempio, gli anticorpi di vostro padre potrebbero riconoscere gli epitopi presenti in vostra madre; qualche gene per gli anticorpi ereditato da vostro padre dovrebbero quindi codificare in voi per anticorpi in grado di riconoscere gli epitopi ereditati da vostra madre.

L'autotolleranza, dunque, non è innata: è qualcosa che il sistema immunitario deve avere appreso nella vita embrionale o eliminando o paralizzando tutti i linfociti che produrrebbero anticorpi capaci di riconoscere le sostanze dell'organismo a cui esso appartiene.

Nel 1890, in Germania, E. von Behring e S. Kitazato scoprirono l'esistenza degli anticorpi, ma soltanto tra il 1960 e il 1970 la struttura di queste sostanze è stata determinata attraverso indagini a cui hanno dato l'avvio R. R. Porter dell'Università di Oxford e G. M. Edelman del Rockefeller Institute. Appunto per queste ricerche i due studiosi hanno ricevuto l'anno scorso il premio Nobel. Molto tempo prima che

Schema della struttura lineare di una molecola di anticorpo. Le due catene pesanti e le due leggere sono connesse da legami disolfuro. Hanno tutte un'estremità amminica (NH_2) e una carbossilica (COOH) e sono costituite da regioni variabili (*V*) in cui la sequenza amminoacidica cambia nei vari anticorpi, e da regioni costanti (*C*).

Il ripiegamento delle quattro catene che costituiscono la molecola di un anticorpo viene suggerito da questo disegno di un modello costruito da Edelman in cui ogni pallina rappresenta un amminoacido. Le regioni variabili sono indicate in colore.

la loro struttura fosse nota, gli anticorpi erano stati oggetto, tuttavia, di studi molto particolareggiati. Malgrado ciò non si sapeva che essi erano prodotti da linfociti attivati. Una ventina di anni fa non si pensava ancora che i linfociti avessero qualcosa a che fare con il sistema immunitario, cosa che appare strana oggi che sappiamo che essi sono addirittura parte del sistema immunitario. Solo agli inizi degli anni '60, la funzione dei linfociti venne dimostrata da J. L. Gowans e D. McGregor dell'Università di Oxford.

La massima parte dei linfociti (all'incirca il 98 per cento) in realtà non produce anticorpi. Si tratta dei linfociti « piccoli », cellule sferiche del diametro di circa un centesimo di millimetro che si ritiene siano in condizione di riposo. Per poter elaborare un anticorpo, un piccolo linfocita deve innanzitutto ingrossarsi. In questo nuovo stato, infatti, non soltanto può secernere le molecole dell'anticorpo, ma può anche dividersi e formare due cellule, le quali a loro volta possono formarne quattro e cosí via. Le varie cellule figlie costituiscono il clone, o discendenza cellulare, derivato da un unico piccolo linfocita.

Come venne originariamente postulato da Burnet nel 1957, le molecole di anticorpo prodotte da un linfocita e dalle cellule che costituiscono il suo clone, hanno tutte identici siti di combinazione. G. J. V. Nossal, il successore di Burnet alla direzione del Walter and Eliza Hall Institute of Medical Research di Melbourne, ha raccolto assieme ai suoi collaboratori molte prove sperimentali in favore di questo « unico mandato » dei linfociti. Le cellule di un clone di linfociti sono impegnate nell'espressione di due geni particolari che codificano per determinate varianti delle regioni variabili della catena leggera e della catena pesante. Già allo stato di riposo, privo di qualsiasi funzione elaboratrice, un piccolo linfocita produce un numero relativamente scarso di proprie molecole anticorpali, che dispone alla superficie della membrana esterna. Queste molecole sono i recettori della cellula. Il linfocita ne presenta circa centomila, con identici siti di combinazione, in attesa – per cosí dire – d'incontrarsi con un epitopo che si adatti a essi.

Quando entra in contatto con un tale epitopo, il linfocita può essere stimolato (cioè rispondere positivamente) oppure essere paralizzato (cioè rispondere negativamente). Indagini in corso, effettuate a Losanna da D. S. Rowe della World Health Organization e da Benvenuto Pernis del nostro Istituto di immunologia di Basilea fanno pensare che la distinzione tra segnali eccitatori e inibitori possa consistere in qualche differenza nelle regioni costanti delle molecole di anticorpi che costituiscono i recettori dei linfociti. Si può dimostrare che la risposta positiva o negativa da parte di un linfocita dipende da parecchie condizioni: la concentrazione degli epitopi riconosciuti, il grado in cui questi epitopi si adattano ai siti di combinazione dei recettori, il modo in cui essi sono presentati (per esempio su molecole oppure superfici cellulari) e la presenza o assenza di altri linfociti, che possa favorire o sopprimere una risposta. Buona parte dell'attuale sperimentazione tende a chiarire questi complessi problemi.

Un linfocita stimolato deve far fronte a due impegni: deve produrre molecole di anticorpi per poterle secernere e deve dividersi in modo da dar origine a un clone di cellule discendenti, che trasmettano il suo mandato. Le cellule discendenti che si mettono tutte a produrre e a secernere molecole di anticorpi sono chiamate plasmacellule. Ognuna deve trascrivere i propri geni per gli anticorpi in 20 000 molecole di RNA messaggero, che è sufficiente per 200 000 ribosomi permettendo cosí alla cellula di produrre e di secernere 2000 molecole identiche di anticorpi al secondo. Altre cellule del clone non giungono sino a questo punto: esse ritornano allo stato di riposo e rappresentano la « memoria » dell'avvenimento, tenendosi pronte a rispondere se l'epitopo dovesse riapparire. La memoria immunologica di ciò che S. Fazekas de St. Groth della Università di Sidney, ricercatore oggi presso il nostro laboratorio di Basilea, ha chiamato il « peccato originale antigenico » ha una notevole persistenza. Per esempio, persone che hanno oggi novant'anni e che hanno avuto un'influenza alla fine dell'ottocento possiedono ancora anticorpi circolanti contro gli epitopi dei ceppi virali dell'influenza, predominanti a quell'epoca.

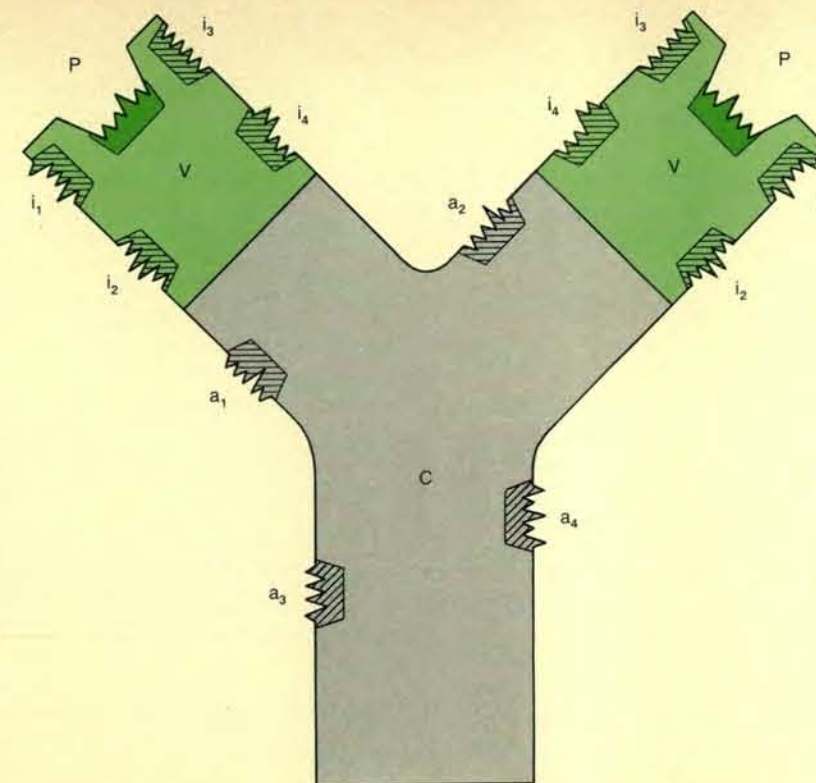
Se un linfocita che riconosce un epitopo non viene stimolato, può rimanere paralizzato. La paralisi può verificarsi quando un linfocita si trova in presenza di altissime concentrazioni di epitopo: è questa allora una tolleranza a zone di alta concentrazione. D. W. Dresser e N. Avrion Mitchison, che lavoravano al National Institute for Medical Research, hanno dimostrato che la paralisi può anche verificarsi per la continua presenza di concentrazioni estremamente basse di epitopo, al disotto della soglia necessaria per la stimolazione: si parla allora di tolleranza a zone di bassa concentrazione. Sono necessarie ulteriori conoscenze sui meccanismi che determinano la paralisi non soltanto per capire come il sistema immunitario impari a tollerare i propri epitopi, ma anche per poter indurre tale sistema a tollerare i trapianti d'organo.

Le molecole degli anticorpi sono visibili al microscopio elettronico quando sono unite ad antigeni e l'una all'altra in complessi antigene-anticorpo. In questa micrografia, eseguita da N.M. Green e da R. Valentine del National Institute for Medical Research di Londra, si notano anticorpi di coniglio ingranditi 500 000 volte. L'antigene è una corta catena polipeptidica con un raggruppamento dinitrofenilico a ogni estremità; gli anticorpi sono stati ottenuti da conigli immunizzati contro gli epitopi costituiti dai dinitrofenili. Gli antigeni (troppo piccoli per essere visibili) si legano agli anticorpi in complessi poligonali, la cui forma geometrica dipende dalla struttura dell'anticorpo.

L'enorme variabilità degli anticorpi fa sorgere il quesito sull'origine dei geni che codificano per le regioni variabili delle loro molecole. Sono state avanzate essenzialmente due risposte: la teoria della linea germinale e quella del soma. La tesi della prima teoria è semplice: tutte le cellule somatiche, inclusi i linfociti, hanno lo stesso assetto di geni, cioè quelli dell'uovo fecondato da cui è derivato l'individuo. Pertanto i geni per qualsiasi anticorpo che un individuo può produrre devono già essere stati presenti nell'uovo fecondato e sono tutti trasmessi ai figli di quell'individuo attraverso le cellule della linea germinale: uova e spermatozoi e loro precursori.

La teoria del soma non accetta questo modo di affrontare la questione. Si sostiene che il sistema immunitario abbia bisogno di milioni di anticorpi diversi per riconoscere gli epitopi. I singoli topi di un ceppo puro (inincrociato) che hanno tutti gli stessi geni della linea germinale, fanno uso – come si è dimostrato – di serie completamente diverse di molecole di anticorpi. La teoria della linea germinale implica che il progetto di costruzione di tutte queste serie di anticorpi sia presente nei geni di ogni singolo topo appartenente a quel ceppo, ma in questo caso molti geni non sembrerebbero avere un valore per la sopravvivenza del topo e un simile grande numero di geni non può sorgere o essere mantenuto nell'evoluzione darwiniana. La massima parte dei geni per gli anticorpi deve quindi essere comparsa nel corso dello sviluppo somatico dell'individuo, per modificazione di un numero piú piccolo di geni della linea germinale. Questo è il punto di partenza per parecchie varianti della teoria somatica.

Ho proposto che sia una serie di geni della linea germinale, trasmessa per via ereditaria, a codificare per gli anticorpi contro certi epitopi dello stesso organismo. I cloni di cellule che rappresentano l'espressione di questi geni vengono soppressi a esclusione delle cellule mutanti che, mediante sostituzione di un amminoacido, mostrano nuovi siti di combinazione sui loro recettori anticorpali. Queste cellule mutanti rappresentano l'enorme repertorio di anticorpi che riconoscono gli epitopi estranei. Un organo che le potrebbe produrre è il timo: piú di 10^{10} nuovi linfociti si formano in esso ogni giorno; la grande maggioranza viene uccisa in quella stessa sede o immediatamente dopo che i linfociti l'hanno lasciata.

Tutti i linfociti che circolano nei tessuti sono derivati da precursori, cellule presenti nel midollo osseo. Circa la metà di essi, le cellule T, passano attraverso il timo per raggiungere successivamente i tessuti; l'altra metà, le cellule B, no. Questa dicotomia è stata scoperta per la prima volta da H.N.

Viene qui ricostruita la topografia funzionale della molecola di un anticorpo. L'estremità di ogni braccio della Y ha un sito di combinazione (*p*) che riconosce gli epitopi sulle molecole di antigene. Anche l'anticorpo ha i propri epitopi che possono essere riconosciuti dai siti di combinazione di altri anticorpi. Essi comprendono gli allotopi (*a*) situati nelle regioni costanti e gli idiotopi (*i*) nelle regioni variabili.

Le strutture triangolari nella micrografia della pagina a fronte sono complessi di tre molecole di anticorpi, unite da antigeni che presentano alle estremità raggruppamenti dinitrofenilici. Le dimensioni sono state calcolate in base a micrografie elettroniche.

Claman della Scuola di medicina dell'Università del Colorado e ne sono state delineate le caratteristiche da J. F. Miller e G. Mitchell, ambedue ricercatori oggi presso il nostro istituto di Basilea. Le cellule T e le cellule B non si distinguono per la forma, ma solo le B e le loro discendenti secernono le molecole da anticorpi. Si potrebbe pensare che ciò riduca a ben poca cosa la finalità delle cellule T: al contrario esse risultano molto importanti. Possono riconoscere anch'esse degli epitopi e devono quindi, quasi per definizione, possedere molecole di anticorpi come recettori di superficie, anche se queste molecole recettrici sono state molto piú difficilmente dimostrate sperimentalmente di quelle delle cellule B.

Le cellule T possono uccidere altre cellule, per esempio quelle cancerose e trapianti di tessuti che presentano epitopi estranei all'organismo. Le cellule T possono anche sopprimere le cellule B o, alternativamente, possono favorire la stimolazione delle cellule B da parte degli epitopi. Una simile funzione di sostegno delle cellule T è stata ripetutamente dimostrata negli esperimenti su animali e in esperimenti con cellule in coltura. In questi ultimi, basati su una tecnica sviluppata da R. W. Dutton e da R. I. Mishell dell'Università di California a San Diego, linfociti prelevati dalla milza di un animale non trattato sono stati coltivati su piastra di plastica assieme a molecole o a cellule che presentano epitopi estranei a essi. Dopo alcuni giorni d'incubazione, si è potuta dimostrare la presenza, nella coltura, di linfociti che producono e secernono le molecole di anticorpi contro gli epitopi estranei, utilizzando il metodo che permette di saggiare singole cellule produttrici (*si veda la figura a pagina 71*). Le molecole di anticorpi sono prodotte dalle cellule B, ma l'esperimento non avrà un normale svolgimento se sono presenti soltanto esse. Non appena si aggiungono alla piastra di coltura le cellule T, le cellule B cominciano a reagire e a produrre anticorpi.

La dicotomia del sistema immunitario in linfociti T e B dà una ulteriore dimensione all'impostazione concettuale necessaria per la comprensione del sistema. Non è questa soltanto un'esigenza intellettuale, ma anche pratica, poiché si sa oggi che il sistema immunitario interviene in maniera cruciale in un vasto numero di malattie: dalle infezioni microbiche alle allergie, dal cancro ai reumatismi e ai fenomeni autoimmunitari e a molti altri processi degenerativi della senescenza.

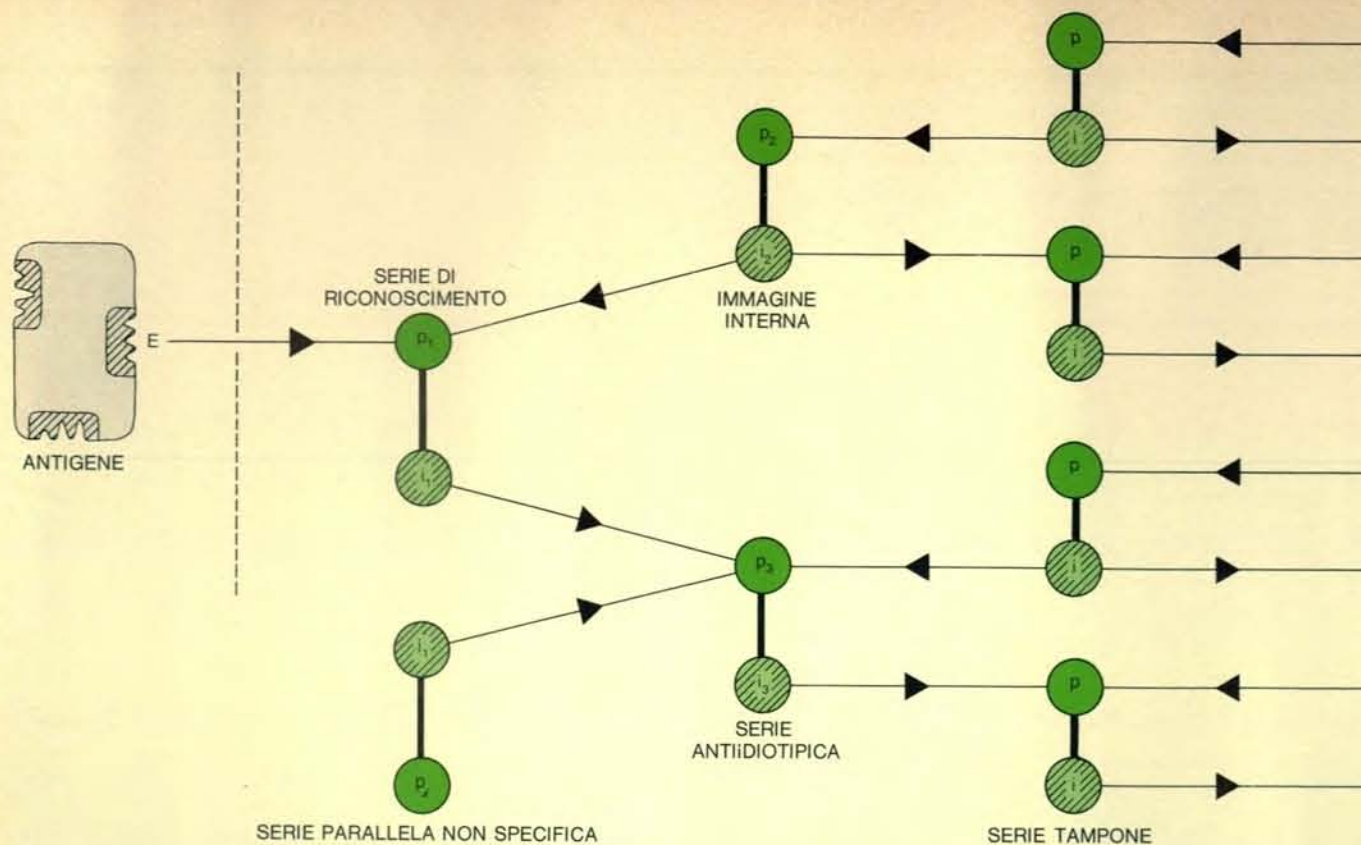
I linfociti, cioè le cellule del sistema immunitario, producono anticorpi. Ogni cellula riceve precocemente il compito di sintetizzare un anticorpo specifico. In riposo, il piccolo linfocita (*a sinistra*) presenta tali molecole di anticorpi (*in colore*) come recettori sulla sua superficie. Il sopraggiungere di un antigene con epitopo che si adatta al sito di combinazione di questa particolare molecola di anticorpo può stimolare il linfocita a crescere, a cambiare struttura e a dividersi, dando origine a un grande numero di plasmacellule (*a destra*). Queste sono linfociti specializzati per la rapida sintesi e secrezione delle molecole di anticorpi, specifiche di questa genealogia cellulare.

Le molecole di anticorpo che fungono da recettori sono visibili grazie a una colorazione fluorescente in questa micrografia effettuata da Benvenuto Pernis. Le cellule sono piccoli linfociti di un paziente con leucemia linfocitica, in cui una genealogia di linfociti prolifera senza alcun controllo. Le molecole dei recettori presenti sulle superfici delle cellule hanno, nelle loro regioni costanti, degli epitopi (allotopi), che sono caratteristici delle molecole anticorpali umane. Un anticorpo contro quegli allotopi viene preparato iniettando siero umano in conigli. La rodamina, un colorante fluorescente, si unisce agli anticorpi, che vengono poi aggiunti a una sospensione di linfociti. Le macchie chiare visibili su queste cellule rappresentano l'anticorpo fluorescente.

Ho menzionato due sorprendenti dualismi all'interno del sistema immunitario. Uno è la dicotomia dei linfociti in cellule T e cellule B, con funzioni che sono in parte sinergiche e in parte antagonistiche. L'altro è il dualismo della potenziale risposta di un linfocita quando i suoi recettori riconoscono un epitopo: può rispondere sia positivamente (venendo stimolato), sia negativamente (rimanendo paralizzato).

È importante sapere anche che il sistema immunitario esibisce un terzo dualismo e cioè che le molecole degli anticorpi possono riconoscere e a loro volta essere riconosciute. Non solo hanno siti di combinazione, che permettono loro di riconoscere gli epitopi, ma esibiscono a loro volta degli epitopi che permettono loro di essere riconosciute dai siti di combinazione di altre molecole di anticorpi. Questo discorso vale per le molecole di anticorpi attaccate alle membrane esterne dei linfociti e funzionanti da recettori come pure per le molecole di anticorpi che circolano liberamente e possono essere considerate come messaggi emessi dai linfociti.

Gli epitopi sono presenti sia nelle regioni costanti sia in quelle variabili di una molecola di anticorpo. Poiché

ANTIGENE
SERIE DI RICONOSCIMENTO
IMMAGINE INTERNA
SERIE ANTIIDIOTIPICA
SERIE PARALLELA NON SPECIFICA
SERIE TAMPONE

La rete linfocitaria è stata schematizzata qui in un tentativo d'indicare come si stabilisce il suo stato di equilibrio e come la rete risponda a un antigene. Un epitopo (*E*) sull'antigene viene riconosciuto da una serie (p_1) di siti di combinazione, presenti sulle molecole di anticorpi: sia anticorpi circolanti, sia recettori localizzati sulle superfici cellulari. Le cellule con recettori della serie di riconoscimento p_1 sono potenzialmente capaci di rispondere allo stimolo antigenico (*punta della freccia*) dell'epitopo *E*, ma vi sono alcune limitazioni. Le stesse molecole che portano i siti di combinazione p_1 portano anche una serie di idiotopi (i_1). Questi sono riconosciuti all'interno del sistema da una serie di siti di combinazione (p_3), chiamata serie antiidiotipica, in quanto tendono a sopprimere (*freccia in senso inverso*) le cellule della serie i_1. Questi idiotipi i_1 si trovano anche sulle molecole con siti di combinazione che non appartengono alla serie di riconoscimento p_1, ma sono non specifici nei confronti dell'epitopo E. D'altra parte, la serie p_1 riconosce anche gli epitopi interni i_2, che costituiscono quindi un'immagine interna dell'epitopo estraneo *E*. Nello stato stazionario, le molecole dell'immagine interna tendono a stimolare le cellule della serie p_1 equilibrando la tendenza soppressiva della serie antiidiotipica. Quando l'antigene estraneo penetra nel sistema, il suo effetto stimolante sulla serie di riconoscimento p_1 permette alle cellule di quella serie di sfuggire alla soppressione (la stessa cosa accade a cellule non specifiche della serie parallela p_x). La risposta immunitaria che ne risulta è modulata da effetti tampone di serie di siti di combinazione e di idiotopi (*a destra*) che controllano la risposta.

le configurazioni degli epitopi delle regioni variabili sono determinate dalle sequenze amminoacidiche variabili delle catene polipeptidiche, esistono milioni di differenti epitopi. Il complesso di tali epitopi su una determinata molecola di anticorpo è stato chiamato da Oudin l'idiotipo di quella molecola. Quando gli anticorpi prodotti da un animale A sono iniettati in un animale B, questo produrrà anticorpi contro gli epitopi idiotipici (idiotopi) delle molecole di anticorpi iniettate. Ciò vale anche quando A e B appartengono alla stessa specie animale e perfino quando sono dello stesso ceppo puro, cioè quando sono geneticamente identici. Sta quindi per essere dimostrato che, in un determinato animale, gli idiotopi che si trovano su una molecola di anticorpo sono riconosciuti dai siti di combinazione posti su una serie di altre molecole di anticorpi e che gli idiotopi presenti sulle molecole recettrici di un linfocita sono riconosciuti dai siti di combinazione delle molecole recettrici di una serie di altri linfociti. Abbiamo cosí una rete di linfociti e di molecole di anticorpi che riconoscono altri linfociti e altre molecole di anticorpi, i quali a loro volta ne riconoscono altri ancora.

Sono convinto che la descrizione del sistema immunitario come rete funzionale di linfociti e di molecole di anticorpi è essenziale alla sua comprensione e che tale rete nel suo complesso funzioni in modo peculiare e tipico delle interazioni interne degli elementi del sistema immunitario stesso. Essa esibisce un comportamento che ritengo caratteristico. Esiste un crescente numero di dati in favore di questo punto di vista.

Le molecole di anticorpi sono normalmente presenti nel sangue in una concentrazione di circa $5 \cdot 10^{16}$ unità per millilitro. La concentrazione dei siti di combinazione e degli idiotopi è quindi dell'ordine di 10^{17} per millilitro. Se il sistema immunitario facesse uso di 10 milioni di diversi siti di combinazione e di 10 milioni di diversi idiotopi, ogni singola variante di questi elementi sarebbe presente in media in una concentrazione di circa 10^{10} unità per millilitro. È stato dimostrato che concentrazioni di epitopi, variabili per i diversi antigeni da 10^6 a 10^{12} epitopi per millilitro, sono sufficienti o a sopprimere o a paralizzare i linfociti in grado di riconoscere gli epitopi. Nisonoff e collaboratori del collegio di medicina dell'Università dell'Illinois e H. Cosenza e H. Köhler dell'Università di Chicago hanno dimostrato che, iniettando in un animale anticorpi contro un idiotipo, si sopprimono i linfociti che hanno recettori con idiotopi riconosciuti da quegli anticorpi.

Ciò significa che i linfociti sono soggetti a continua soppressione da parte di altri linfociti e di molecole di anticorpi con idiotopi o siti di combinazione adatti a essi. Alcuni linfociti sfuggono alla soppressione o decadono. Il comportamento peculiare di cui si è detto sopra consiste in uno stato di equilibrio dinamico del sistema che si stabilisce allorquando i suoi elementi interagiscono. A mano a mano che il sistema si espande nel corso dello sviluppo e dell'esistenza, nuovi idiotopi e nuovi siti di combinazione emergono. Gli epitopi di altri tessuti, ma appartenenti allo stesso organismo, fanno sentire il loro influsso sulla rete e inducono certi elementi a diventare piú numerosi e altri a esserlo meno. In questo modo ogni individuo sviluppa un diverso sistema immunitario.

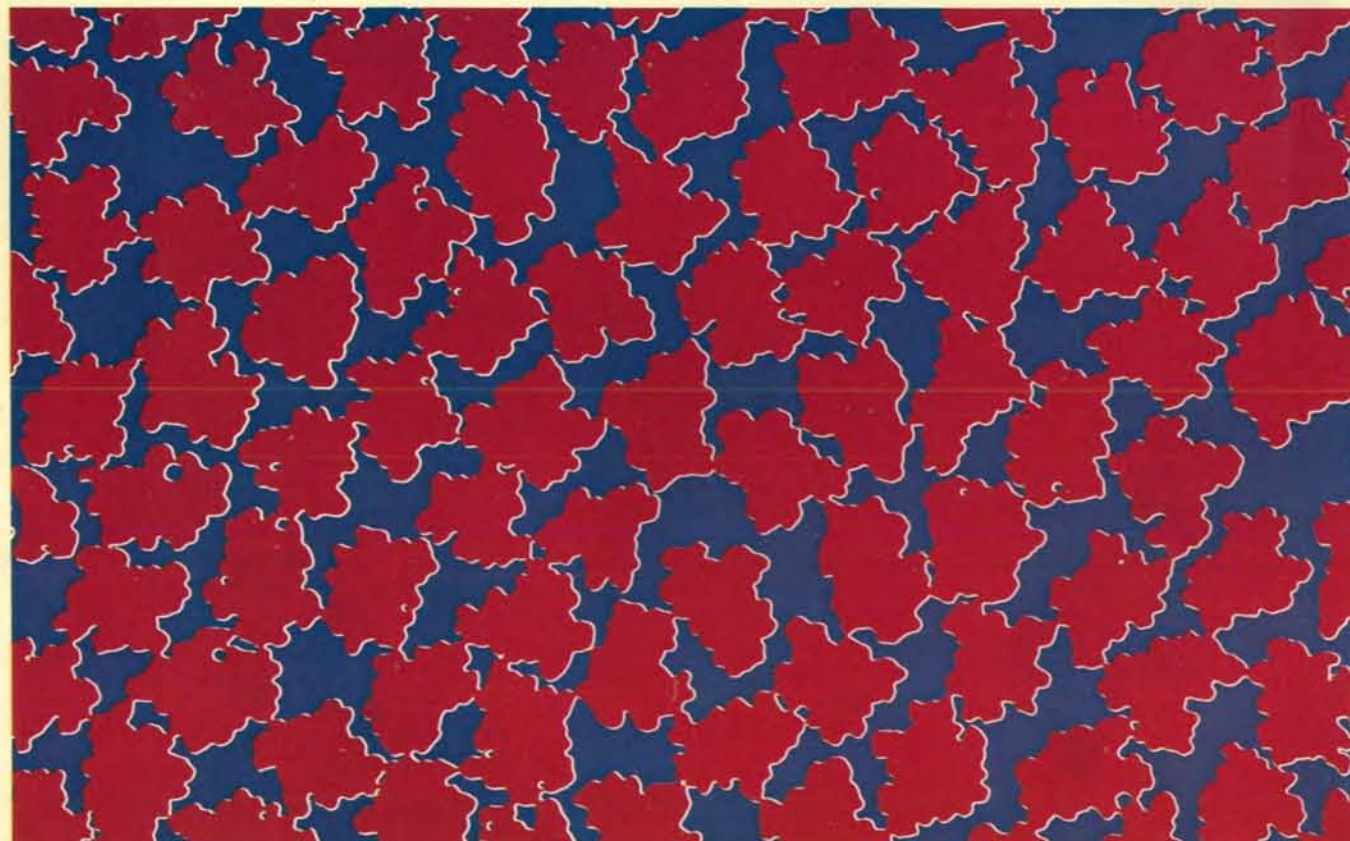
Antigeni estranei che penetrano nell'organismo modulano la rete; le impronte piú precoci sono quelle che lasciano le tracce piú profonde. Un dato epitopo estraneo verrà riconosciuto, con vari gradi di precisione, dai siti di combinazione di una serie di molecole di anticorpi. I linfociti che hanno il compito di produrre molecole di anticorpi di quella serie sono quindi stimolati e diventano piú numerosi. Tuttavia, non è questa la sola impronta lasciata dall'epitopo estraneo. La serie di siti di combinazione che riconosce l'epitopo riconosce anche una serie di idiotopi all'interno del sistema, una serie di idiotipi che costituiscono la « immagine interna » dell'epitopo estraneo. I linfociti che rappresentano l'immagine interna saranno quindi coinvolti in un secondo tempo e cosí via nelle successive ondate di riconoscimento che si verificano a mano a mano nella rete (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Il sistema immunitario e il sistema nervoso sono gli unici capaci di rispondere in maniera adeguata a una enorme varietà di segnali. Ambedue i sistemi mostrano dicotomie: le loro cellule possono sia ricevere, sia trasmettere segnali e i segnali possono essere sia di natura eccitatoria, sia di natura inibitoria. I due sistemi penetrano nella massima parte degli altri tessuti corporei, ma sembrano evitarsi a vicenda: la barriera ematoencefalica impedisce ai linfociti di entrare in contatto con le cellule nervose.

Le cellule nervose o neuroni sono in posizioni fisse nel cervello, nel midollo spinale e nei gangli e i loro lunghi processi, gli assoni, le collegano formando una rete. La capacità dell'assone di un neurone di formare sinapsi con la serie giusta di altri neuroni richiede qualcosa di simile a un riconoscimento di epitopi. I linfociti sono 100 volte piú numerosi delle cellule nervose e, diversamente da queste ultime, sono liberi di muoversi. Tuttavia, anch'essi interagiscono sia mediante incontri diretti, sia attraverso le molecole di anticorpi che producono. Possono riconoscere ed essere parimenti riconosciuti: facendo cosí, formano una rete. Come nel caso del sistema nervoso, la modulazione della rete da parte di segnali estranei rappresenta il suo adattamento al mondo esterno. Ambedue i sistemi apprendono quindi in base all'esperienza e si costruiscono una memoria, memoria che si conserva mediante rinforzo, ma non può essere trasmessa alle generazioni future. Queste sorprendenti analogie nell'espressione dei due sistemi possono derivare dalle similitudini esistenti nel complesso di geni che codificano per la loro struttura e che controllano il loro sviluppo e la loro funzione.

Le molecole di anticorpo interne, prodotte dalle plasmacellule mediante secrezione, in questa micrografia e in quella in basso, ambedue eseguite da Pernis, appaiono colorate. Le plasmacellule sono di un coniglio eterozigotico per il gene strutturale che determina la regione costante della molecola dell'anticorpo e quindi la sua serie di allotopi o il suo allotipo. Cioè il coniglio ha ereditato cromosomi paterni e materni contenenti due diversi geni determinanti. Le plasmacellule sono state colorate con due preparati di anticorpi fluorescenti: uno, a cui è stato accoppiato un colorante con fluorescenza verde, è contro l'allotipo paterno (chiamato allotipo A), mentre l'altro è contro l'allotipo materno (B). Gli anticorpi interni in alcune plasmacellule si legano al preparato con fluorescenza verde, dimostrando di portare l'allotipo A.

Altri anticorpi interni, in altre plasmacellule nello stesso punto del preparato in cui è stata effettuata la micrografia in alto in questa pagina, si colorano di rosso. Sono molecole con allotipi B. Benché tutti i linfociti e plasmacellule contengano cromosomi materni e paterni, ogni cellula esprime l'uno o l'altro gene per la regione costante.

Questa microfotografia ottica con ingrandimento di circa 200 diametri mostra un composito laminato le cui lamine o strati successivi sono a loro volta compositi a fibra montati perpendicolarmente l'uno rispetto all'altro. Il materiale chiamato composito multidirezionale Thornel 50 è fabbricato dalla Union Carbide. Esso consiste di fibre di grafite (*in rosso*) incorporate in una matrice di resina epossidica (*in blu*). Le fibre di grafite vengono prodotte per carbonizzazione di filamenti di raion.

L'ingrandimento di uno strato trasversale del composito Thornel 50 mostrato nella fotografia in alto in questa pagina, rivela le sezioni irregolari delle singole fibre e la distribuzione uniforme di queste nella matrice. L'ingrandimento è di circa 3000 diametri.

Moderni materiali compositi

I materiali nei quali le proprietà di un costituente esaltano quelle di un altro, sono in continua evoluzione. Con la riduzione di costo dei nuovi costituenti questi materiali faranno la loro comparsa in impieghi comuni

di Henry R. Clauser

Tra i materiali compositi sono compresi diversi dei più antichi e dei più moderni materiali strutturali. Gli uomini hanno scoperto ben presto che quando due o più materiali vengono uniti per formarne uno solo la loro combinazione offre spesso prestazioni migliori dei singoli componenti. Seguendo questo principio vennero composti i laterizi combinando l'argilla e la paglia e furono creati gli archetti per strumenti musicali con tendini, legno e seta tenuti insieme da colla.

Salvo alcune notevoli eccezioni, dopo queste scoperte le ulteriori possibilità delle strutture composite rimasero virtualmente inutilizzate per molti secoli mentre le principali esigenze di una tecnologia in fase di sviluppo venivano soddisfatte con materiali semplici come il ferro o il rame. Perfino in tempi più recenti, con l'affermazione del cemento armato, del linoleum e dei pannelli di intonaco e di legno compensato, i materiali compositi sono sembrati, in un certo senso, le soluzioni ideali per alcuni problemi specifici e sono quindi rimasti ai margini della corrente principale dello sviluppo e della ricerca tecnologica sui materiali.

Comunque, durante gli anni trenta e quaranta, strutture leggere a nido d'ape, parti di macchine realizzate per la sinterizzazione di polveri metalliche e materie plastiche rinforzate con fibre di vetro divennero delle realtà commerciali. Questi sviluppi caratterizzarono l'inizio dell'era moderna dei materiali tecnici compositi il cui impiego è in costante aumento. Per esempio, il consumo di resine rinforzate con fibre ha avuto il sorprendente incremento del 25 per cento annuo. Tuttavia l'apparizione di questa precisa disciplina e di una tecnologia propria dei materiali compositi conta appena dieci anni. Si calcola che l'80 per cento di tutti gli sviluppi e le ricerche sui compositi sia stato realizzato dopo il 1965 quando l'Aviazione militare americana intraprese un programma per rendere una realtà pratica i compositi a fibra di elevate caratteristiche.

Ci sono due motivi principali che determinano l'interesse generale per i materiali compositi: il primo è semplicemente la richiesta di materiali che sostituiscano quelli semplici tradizionali, il secondo, e il più importante a lungo termine, è che i materiali compositi offrono agli ingegneri l'opportunità di progettare strutture completamente nuove che possiedono l'insieme delle proprietà peculiari necessarie per un compito specifico. I nuovi materiali, sebbene siano di solito più costosi a parità di peso di quelli convenzionali, possono essere usati in quantità più limitate a causa delle loro caratteristiche superiori.

Non esiste una definizione generale e universalmente accettata dei materiali compositi. Nei dizionari e nel significato comune il termine « composito » si riferisce al concetto di qualcosa composto di parti o elementi eterogenei. Se si cerca di applicare questa nozione all'intera gerarchia strutturale dei materiali si finirà per comprendervi tutti o quasi i materiali. Perché sia significativa, quindi, occorre limitare la definizione di composito al livello macrostrutturale dove si ha a che fare con costituenti come fibre di vetro, particelle di metallo e matrici. Su questa base una definizione dei compositi, utile anche se imperfetta, è che essi sono un miscuglio di fasi macroscopiche composte di materiali in uno stato suddiviso i quali in genere differiscono nella forma o nella composizione chimica o in entrambe. Contrariamente a una supposizione largamente diffusa, questa definizione non richiede che un composito sia costituito da materiali chimicamente differenti sebbene questo sia il caso normale. Le caratteristiche più importanti che distinguono un composito sono la geometria interna e il fatto che la prestazione corrisponde al comportamento collettivo dei suoi costituenti.

Un'altra necessaria e importante distinzione è che le proprietà dei compositi possono essere sia isotrope sia anisotrope. Al contrario i materiali semplici convenzionali sono generalmente trattati come isotropi, cioè come aventi delle proprietà che si mantengono essenzialmente costanti in qualsiasi direzione. Le proprietà dei compositi dipendono in generale non solo dalla composizione chimica dei costituenti, ma anche dalla loro geometria e dal loro orientamento. Di conseguenza lungo i piani passanti per un qualsiasi punto di un composito le proprietà possono essere simmetriche o asimmetriche.

I principali costituenti impiegati nei compositi sono: fibre, particelle, lamine, scaglie, « cariche » e matrici. La matrice, che può essere considerata come il costituente « di base », dà al composito la sua forma volumetrica. Gli altri cinque, che possono essere definiti i costituenti strutturali, determinano il carattere della struttura interna del materiale. I compositi più comuni constano di una matrice in cui vengono dispersi uno o più tipi di costituenti strutturali. Per esempio il cemento armato è composto di un conglomerato di sabbia e sassi e di fibre di acciaio (tondini) immersi in una matrice di cemento idraulico. Gli scafi delle imbarcazioni in fibra di vetro sono costruiti con fibre di vetro supportate da una matrice di plastica. Tuttavia non tutti i compositi hanno una matrice; alcuni sono composti solo da costituenti strutturali che hanno di so-

lito due o piú composizioni chimiche diverse. I materiali stratificati (come i pannelli di intonaco) e i laminati metallici (come l'elemento attivo di un termostato) sono costruiti interamente con lamine o strati che, tutti insieme, danno la forma del composito.

Poiché i componenti sono mescolati, esistono sempre zone di contiguità, analoghe ai bordi dei grani nei metalli. Tali regioni possono essere semplicemente delle interfacce rappresentate dalle superfici in contatto o delle interfasi composte da una fase separata aggiuntiva. Esempi di interfasi sono il rivestimento, o agente di accoppiamento, applicato alle fibre di vetro annegate in materie plastiche rinforzate e l'adesivo che tiene uniti gli strati di un laminato.

È evidente che le strutture composite debbono le loro proprietà e il loro comportamento alle proprietà dei componenti e alle interazioni fra questi ultimi. Si prenda dapprima in considerazione come le proprietà dei componenti influiscono sulle prestazioni di un composito. Per quest'aspetto la composizione chimica e la microstruttura dei componenti sono determinanti in modo critico come nel caso dei materiali semplici; sono esse infatti che in gran parte stabiliscono la gamma delle proprietà di un composito. Tuttavia altrettanto importanti sono un certo numero di caratteristiche geometriche. È possibile variare la forma e la dimensione degli elementi componenti e le quantità relative delle loro varie fasi per fornire proprietà specifiche o per ottenere particolari valori fisici. Anche il tipo di distribuzione e di disposizione dei costituenti strutturali contribuisce a determinare le prestazioni del composito: i componenti possono essere dispersi in modo uniforme per procurare proprietà fisiche uniformi o essere distribuiti disuniformemente per ottenere una variazione deliberata delle proprietà da zona a zona. Se desiderato si possono orientare i costituenti strutturali per fornire proprietà direzionali. La possibilità quasi infinita di intervenire sulle variabili rende le strutture composite estremamente versatili.

Andando oltre la natura e le proprietà dei singoli componenti si deve anche tener conto del comportamento collettivo dei vari elementi costitutivi in conseguenza della loro combinazione o interazione. Questa prestazione collettiva o composita ha vari aspetti; il piú semplice di questi deriva forse dalla regola delle miscele la quale stabilisce che il valore quantitativo di una data proprietà è la somma dei valori delle fasi dei costituenti. Cosí il peso di un blocco di calcestruzzo è la somma dei pesi degli elementi che compongono l'aggregato (la sabbia e i sassi) piú il peso del cemento aggiunto.

Questa regola additiva si applica non solo alle proprietà statiche, come il peso, ma anche a quelle dinamiche come la conducibilità termica ed elettrica. Per esempio la conducibilità termica o elettrica approssimativa dei compositi laminati può essere ottenuta semplicemente sommando la conducibilità delle diverse lamine che formano il composito.

Si ha un altro tipo di proprietà collettiva quando ciascuno di due o piú componenti contribuisce con una sua proprietà particolare alle prestazioni complessive. Molti materiali placcati sono costituiti da uno strato superficiale di scarsa robustezza meccanica e con elevata resistenza alla corrosione unito con uno strato sottostante di un materiale che fornisce la solidità e la rigidità strutturale. Sono stati sviluppati molti compositi particolati (cioè in cui uno o piú dei costituenti sono composti da una fase sotto forma di particelle) per sfruttare le proprietà sia delle materie plastiche sia dei materiali. Si sono cosí unite polveri di ferro e di ossidi di ferro con materie plastiche per conferire proprietà magnetiche a queste ultime e si può aggiungere piombo a strutture plastiche per smorzare suoni e vibrazioni.

Il terzo tipo di proprietà dei compositi, e forse il piú importante, è un'espressione del principio generale dei sistemi che un insieme può essere alquanto diverso dalla somma delle sue parti: ciò significa che le proprietà e le funzioni dei costituenti non sono indipendenti fra di loro. Per comprendere questo principio si prenda in esame come viene applicato nel progetto dei compositi da impiegare in strutture portanti. Molti materiali, fra i quali i metalli, la ceramica, il vetro e la grafite hanno un carico di rottura a trazione che può raggiungere molte decine di migliaia di chilogrammi per centimetro quadrato, però, a causa di imperfezioni, quando sono impiegati in forma massiccia il carico di rottura si riduce a una piccola frazione di quello teorico. Queste imperfezioni sono di due tipi principali. Internamente esse si presentano come dislocazioni microscopiche nella struttura cristallina; quando un materiale viene sottoposto a sollecitazione le dislocazioni possono spostarsi rapidamente al suo interno provocando un effetto di taglio che dà luogo al cedimento. Le fessurazioni superficiali sono un'altra causa di frattura: sotto l'applicazione di un carico le sollecitazioni tendono a concentrarsi intorno a piccole incrinature superficiali causando un sovraccarico locale che può produrre una fessurazione catastrofica. I materiali fragili, sebbene siano intrinsecamente i piú robusti, sono i piú vulnerabili a questo tipo di difetto; a causa della mancanza di duttilità fessurazioni anche microscopiche sulla loro superficie possono provocare rotture con sollecitazioni di bassissimo valore.

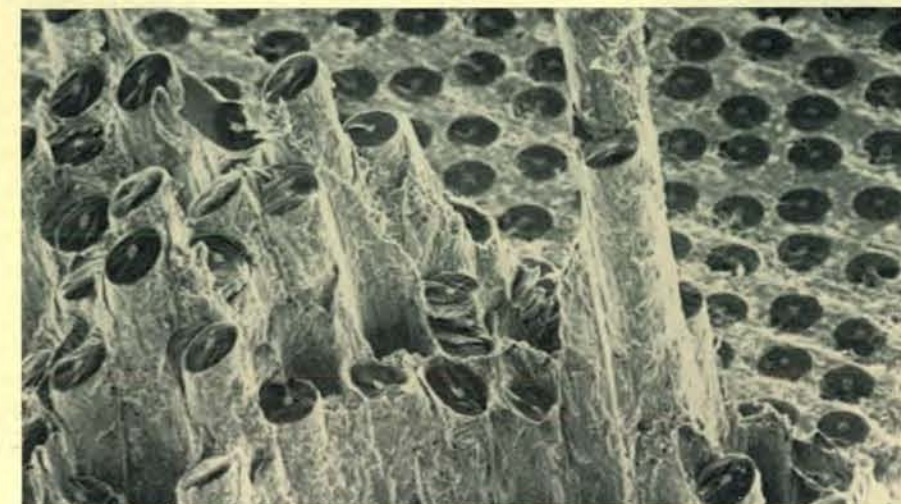
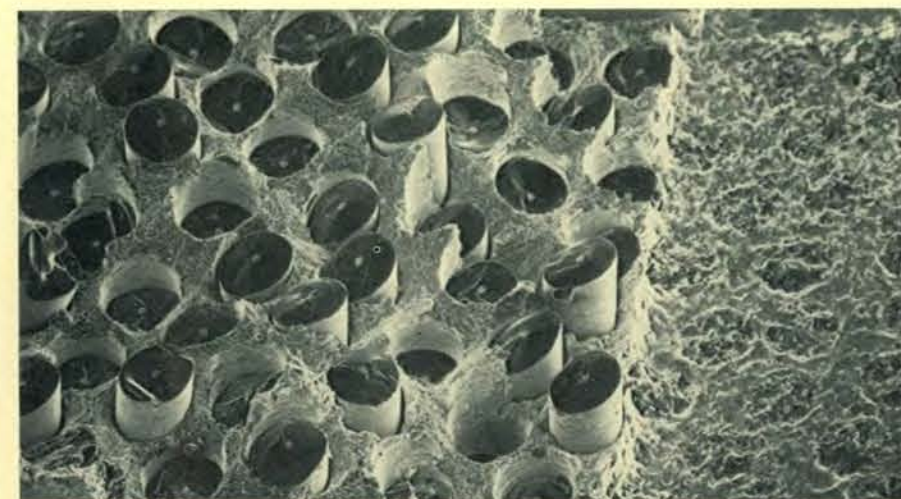
Negli ultimi 50 anni si sono acquisite molte cognizioni sulle dislocazioni nei cristalli, sulle imperfezioni superficiali e sul modo di annullare o mitigare gli effetti delle fratture originate da questi difetti. In Inghilterra A. A. Griffith, alla fine degli anni venti, dimostrò che un materiale sotto forma di fibre è molto piú resistente che non nella forma compatta che viene di solito impiegata, specialmente nel caso dei materiali fragili. Griffith per esempio trovò che le fibre di vetro del diametro di 0,0025 millimetri hanno un carico di rottura a trazione di circa 35 000 chilogrammi per centimetro quadrato e quindi molto superiore a quello di circa 1700 chilogrammi per centimetro quadrato delle barre di vetro dello spessore di 1 millimetro. È poi stato dimostrato che le fibre di vetro e di altri materiali anche piú sottili, possono avere un carico di rottura a trazione superiore a 140 000 chilogrammi per centimetro quadrato. Si ritiene che i diametri estremamente piccoli tendano a ridurre le dimensioni delle fessurazioni superficiali e limitino le direzioni che una fessura può seguire.

Usando il materiale in uno stato suddiviso o frammentario anziché in forma compatta c'è un altro vantaggio oltre all'aumento intrinseco di resistenza. Quando le fessurazioni superficiali o le dislocazioni interne portano alla rottura o alla deformazione plastica, il movimento è limitato a una zona relativamente esigua del materiale. Inoltre la natura discontinua di un insieme di frammenti tende a impedire la propagazione delle fessurazioni e dello scorrimento plastico.

Con un'appropriata selezione dei costituenti si possono produrre strutture composite in grado di resistere ai vari processi di frattura. Uno dei metodi piú vecchi è di unire strati piani di materiale: le interfacce fra i vari strati nel composito laminare hanno la funzione di arrestare il cammino delle fessurazioni. Nella costruzione degli stratificati laminari viene usata un'altra soluzione derivata dal principio della trave con profilato a doppio T: i rivestimenti dello stratificato, realizzati con un materiale di elevata resistenza, corrispondono all'ala del profilato a dop-

pio T e sopportano le sollecitazioni di tensione e di compressione. Il nucleo centrale a bassa densità, per esempio una struttura a nido d'ape, o una resina espansa, rappresenta l'anima del profilato e resiste alla sollecitazione di taglio aiutando a impedire le deformazioni dei rivestimenti. La combinazione di rivestimenti a elevata resistenza con un nucleo a bassa densità forma una struttura estremamente rigida e resistente. Per esempio, uno stratificato a nido d'ape rivestito di alluminio pesa solo un quarto di una lamiera piena di alluminio che presenti la medesima rigidità ai carichi flettenti.

Le strutture composite che offrono di gran lunga il maggior miglioramento delle proprietà meccaniche sono quelle nelle quali materiali finemente suddivisi sono incorporati in una matrice. La matrice, di solito molto piú duttile del costituente strutturale, può avere diverse funzioni: sopportare una frazione o la totalità della sollecitazione applicata; fornire mediante scorrimenti microscopici sotto carico il mezzo per ripartire uniformemente le sollecitazioni applicate ai componenti strutturali e ridistribuire le sollecitazioni dovute a fessurazioni incipienti.

I costituenti strutturali hanno spesso due funzioni: di essere sovente gli elementi portanti principali del carico e di agire come barriere ai movimenti delle dislocazioni all'interno della matrice. Le particelle e le fibre sono le forme principali dei costituenti strutturali usati per sfruttare i vantaggi dei materiali in uno stato finemente suddiviso.

Superfici di frattura per contrasto di differenti compositi rinforzati al boro vicino a un intaglio eseguito a macchina messe a confronto per rivelare la causa e il meccanismo della rottura. In entrambi i casi le fibre di boro sono a loro volta dei compositi poiché realizzate con vapore di boro depositato su un substrato costituito da filo di tungsteno. Nel composito in alto, che consiste di fibre di boro in una matrice di titanio, il vincolo fra matrice e fibre sembra debole con scarsi segni di plasticità nella matrice. Nel composito in basso, composto da fibre di boro in una matrice di alluminio, il vincolo fra matrice e fibre è evidentemente piú forte e la matrice rivela uno scorrimento plastico. Ambedue le microfotografie vennero eseguite presso gli United Aircraft Research Laboratories usando un microscopio elettronico a scansione.

Le caratteristiche geometriche dei costituenti strutturali hanno un'influenza decisiva sulle proprietà del composito; nel caso tipico in cui i costituenti strutturali sono gli elementi portanti del carico la resistenza del composito aumenta di solito con la quantità del componente presente in un dato volume, almeno fino a un certo limite. Nei compositi particolati la distanza delle particelle, che naturalmente è funzione sia del loro diametro sia della loro concentrazione, è strettamente connessa con le proprietà meccaniche. Nei compositi a fibre, nei quali queste sono l'elemento portante del carico, le proprietà meccaniche in una qualsiasi direzione sono generalmente proporzionali alla frazione del volume del materiale rappresentata dalle fibre orientate in quella direzione. Man mano che l'orientamento delle fibre diventa piú casuale la resistenza diminuisce in tutte le direzioni. Altri due fattori critici sono il diametro e la lunghezza delle fibre. In genere le proprietà meccaniche del composito tendono a migliorare al diminuire del diametro. Inoltre le fibre lunghe e continue forniscono una resistenza maggiore di quelle corte.

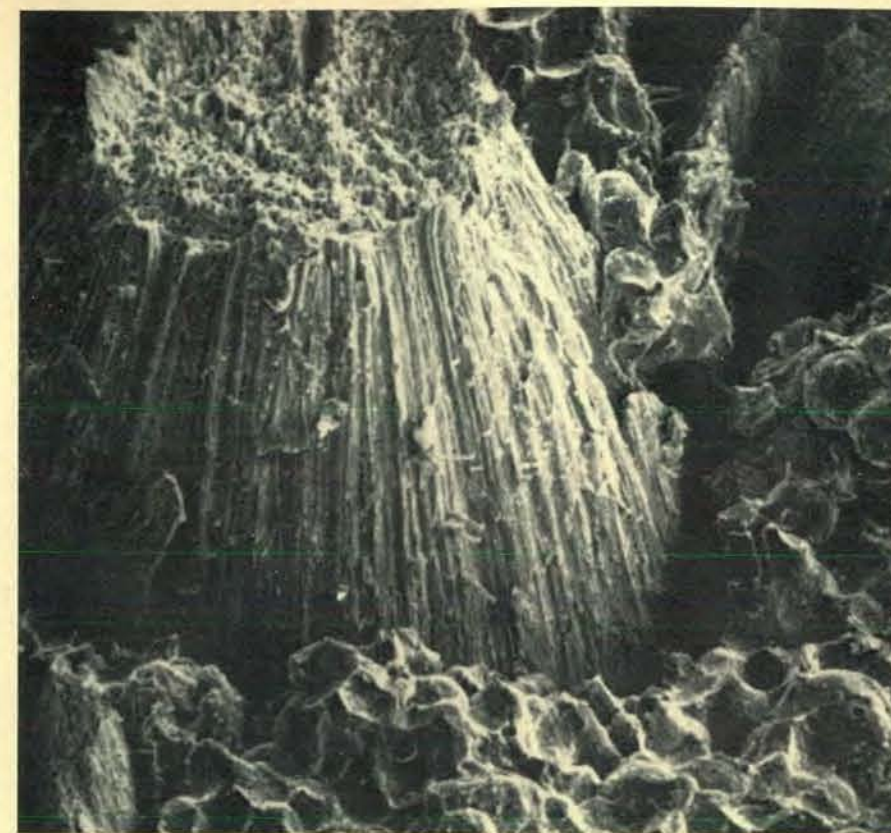
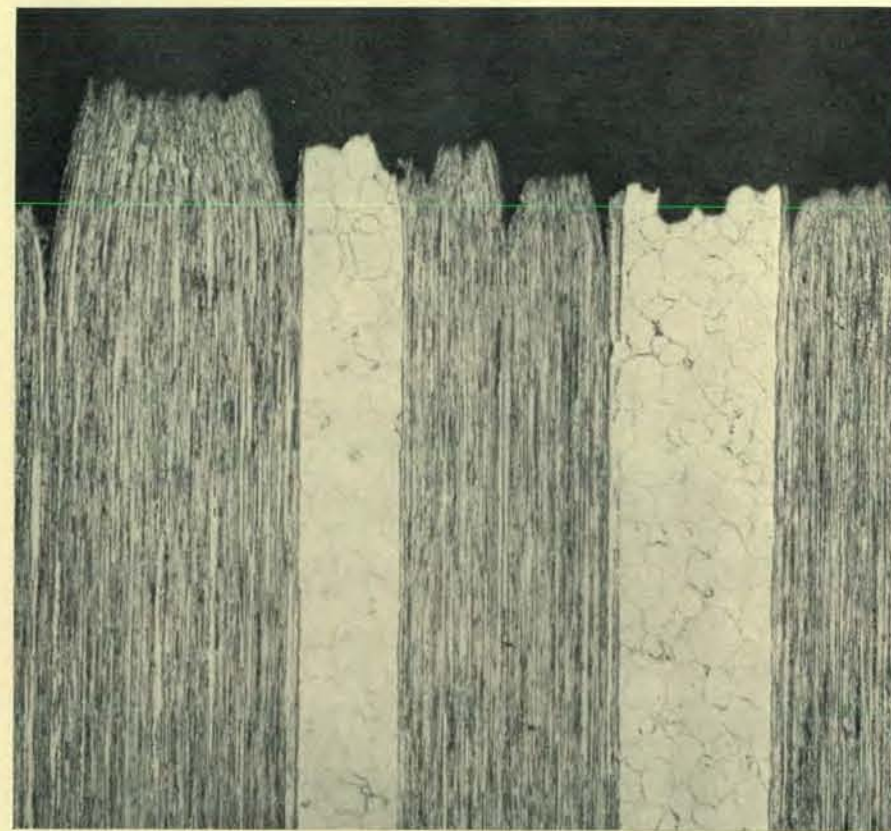
Sebbene le particelle e le fibre siano i costituenti impiegati in prevalenza nei materiali compositi, si è manifestato anche un certo interesse verso le scaglie per ottenere strutture ad alta resistenza. I compositi a scaglie hanno, in teoria, un modulo di elasticità, ossia una rigidità, piú elevata dei compositi a fibre e le loro proprietà sono isotrope nel piano delle scaglie; inoltre, quando è richiesta una densità elevata, le scaglie possono essere stipate in modo piú compatto delle fibre o delle particelle. Tuttavia non è facile produrre le scaglie (salvo quelle in metallo) nella forma e nella dimensione desiderata; la difficoltà di ottenere superfici piane e di evitare fessurazioni superficiali ai bordi, sono altri problemi che limitano l'uso delle scaglie per compositi strutturali ad alta resistenza.

Prendiamo ora in esame i piú recenti sviluppi dei compositi particolati e a fibre. Si possono distinguere due classi distinte di compositi particolati a seconda della dimensione delle particelle e della frazione del volume che esse occupano. I compositi della prima classe, conosciuti come Cermet, sono composti di particelle di ceramica disperse in una matrice metallica; le particelle hanno dimensioni maggiori di un micron e costituiscono una frazione del volume compresa fra il 25 e il 70 per cento. Nei compositi dell'altra classe, detti induriti o rinforzati per dispersione, le particelle hanno dimensione minore di un micron e costituiscono una frazione del volume non superiore al 15 per cento.

Nei compositi rinforzati per dispersione la matrice è il principale elemento portante del carico. Le particelle piccole e dure hanno la funzione di bloccare il movimento delle dislocazioni che si verificano nella matrice. Quindi per un dato materiale che compone la matrice i principali fattori che influiscono sulle proprietà meccaniche sono la dimensione delle particelle, la loro distanza reciproca e la frazione di volume occupato dalla fase delle particelle. In generale la resistenza (specialmente a temperature elevate) aumenta al diminuire della distanza fra queste ultime.

Nei compositi particolati del tipo Cermet la funzione portante è ripartita fra la matrice e le particelle. Quantunque l'interazione fra le due fasi sia complessa e non ancora completamente chiarita, le proprietà meccaniche proprie del Cermet sono funzione della distanza fra le particelle, del loro diametro e anche del rapporto fra le proprietà elastiche di esse e della matrice.

I Cermet vengono prodotti con le tecniche usuali della metallurgia delle polveri nelle quali i costituenti polverulenti vengono sinterizzati mediante calore e pressione. A seconda dei materiali adoperati i compositi rinforzati per dispersione vengono prodotti con i metodi della metallurgia delle polveri o con tecniche implicanti metalli sotto forma liquida o colloidale, seguite da lavorazione a freddo per ottenere alti valori di resistenza.

I compositi particolati non sono affatto una novità. Un Cermet, il carburo di tungsteno, è stato usato per molto tempo negli utensili da taglio; un altro Cermet, il tungsteno con aggiunta di ossido di torio, è stato usato per piú di 30 anni come filamento nelle lampadine. Compositi di alluminio e ossido di alluminio induriti per dispersione, conosciuti come SAP (acronimo di « sintered aluminium powder » – polvere di alluminio sinterizzata), sono di piú recente sviluppo. Essi stanno trovando ora numerose applicazioni perché hanno una buona resistenza contemporaneamente all'ossidazione e alla corrosione e conservano la resistenza meccanica a temperature in corrispondenza delle quali le leghe di alluminio ad alta resistenza risultano notevolmente indebolite. Un altro riuscito composito particolato di questo tipo è una dispersione di ossido di torio in una matrice di nichel TD. Questo composito è tre o quattro volte piú resistente del nichel a temperature fra

Questa microfotografia è una vista obliqua di un composito fratturato per urto, costituito da tenaci fibre di tungsteno (*superfici striate*) in una matrice fragile di superlega al nichel (*superfici alveolate*). La prova è stata eseguita alla temperatura di 760 °C.

Vista longitudinale microfotografica di un composito fratturato per trazione costituito da fibre di tungsteno incorporato in una matrice di superlega al nichel. Questo campione è stato provato a 260 °C. Le due microfotografie riprodotte in questa pagina sono del Lewis Research Center della National Aeronautics and Space Administration.

870 e 1300 gradi centigradi. Altri metalli che sono stati rinforzati per dispersione sono il rame, il piombo, lo zinco, il titanio, il ferro e le leghe di tungsteno.

I compositi particolati possiedono pregi importanti e avranno ulteriori sviluppi, però sono i compositi a fibra che, negli ultimi cinque anni, hanno suscitato per numerosi motivi il maggiore interesse e lo sforzo di sviluppo piú intenso. Anzitutto le fibre sottili sembrano offrire le piú promettenti possibilità per lo sfruttamento delle elevatissime resistenze intrinseche nei materiali strutturali. Inoltre i materiali normalmente rigidi e fragili raggiungono la massima flessibilità quando sono prodotti sotto forma di fibre sottili. La forma di fibra si presta anche a una vasta serie di composizioni e di disposizioni geometriche che consentono all'ingegnere di progettare strutture per soddisfare prestazioni particolari.

L'esempio forse piú comune in natura della funzione di rinforzo delle fibre si trova nella struttura del bambù, un composito in cui delle fibre di cellulosa sono tenute insieme da una matrice di lignina. In pratica qualsiasi tipo di materiale fatto dall'uomo è ora rinforzato con fibre: compositi a fibra si trovano negli oggetti piú disparati come i vassoi dei ristoranti self-service, i battelli da diporto e le carcasse dei motori a reazione a elevate prestazioni. Chiunque abbia seguito il continuo miglioramento dei record di salto con l'asta conosce bene la superiorità delle aste rinforzate con fibre sulle aste di bambù.

Le eccezionali esigenze degli aerei e dei veicoli spaziali ad alte prestazioni sono state determinanti nello stimolare lo sviluppo e l'utilizzazione di moderne strutture rinforzate con fibre. La classe dei nuovi compositi unisce una resistenza elevatissima con un modulo di elasticità eccezionale. Siccome i nuovi materiali hanno anche una bassa densità, forniscono non solo rapporti fra resistenza e peso (cioè la resistenza specifica) estremamente alti, ma anche elevati rapporti fra rigidità e peso (cioè il modulo specifico di resistenza).

I moderni compositi a fibra ampliano la tecnologia che ebbe inizio negli anni quaranta con le fibre di vetro rinforzate con materie plastiche. Oggigiorno nei compositi rinforzati con vetro la matrice può essere sia una resina termoindurente, quale una resina poliestere, fenolica o epossidica, sia una qualsiasi delle numerose resine termoplastiche come il nailon, il polietilene o il polistirene. Negli ultimi anni sono stati sviluppati nuovi vetri con modulo di elasticità di circa 1 000 000 di chilogrammi per centimetro quadrato, superiore di un terzo ai circa 750 000 chilogrammi per centimetro quadrato del tipo di vetro usato nella maggior parte dei compositi commerciali di plastica e vetro. Comunque anche i moduli di resistenza piú elevati rimangono molto al di sotto di quelli delle nuove fibre usate per rinforzare i compositi.

Le due fibre che hanno avuto il maggiore sviluppo per l'impiego in moderni compositi sono il boro e la grafite. Esse vengono incorporate principalmente in matrici di resina epossidica e di alluminio. Le matrici in resina epossidica hanno coesione e tenacità elevate, ma non possono essere impiegate a temperature di lavoro superiori a 225 gradi centigradi. Le matrici in resine poliammidiche estendono di altri 100 gradi la temperatura di lavoro.

I tre sistemi piú studiati sono: l'epossido-boro, il boro-alluminio e l'epossido-grafite. La combinazione di resistenza, rigidità e leggerezza che offrono supera quella di qualunque materiale semplice disponibile in commercio. I compositi di boro, introdotti all'inizio degli anni sessanta quando l'Aviazione militare americana intraprese un intenso programma di sviluppo, vengono realizzati con fibre che sono a loro volta dei compositi. Prodotte per deposizione di vapori di boro su un substrato di tungsteno, tali fibre hanno un peso specifico di circa 2,6 (cioè un peso di 2,6 chilogrammi per decimetro cubo), un diametro compreso fra 0,1 e 0,15 millimetri, possiedono un carico di rottura a trazione di circa 35 000 chilogrammi per centimetro quadrato e un modulo di elasticità di quasi 4 220 000 chilogrammi per centimetro quadrato.

Le fibre di grafite, prodotte per carbonizzazione di fibre di raion o di fibre acriliche, hanno un diametro medio di circa 0,0085 millimetri e un peso specifico fra 1,7 e 2. Per l'impiego nei compositi in genere vengono confezionate in un filato composto di circa 10 000 fibre. Le fibre di grafite, a seconda della fibra di partenza, hanno un carico di rottura compreso fra 14 000 e 35 000 chilogrammi per centimetro quadrato e un modulo elastico fra 2 e 5 milioni di chilogrammi per centimetro quadrato.

Sebbene le proprietà delle fibre di boro e di grafite siano impressionanti, quando sono impiegate come costituenti strutturali in un composito si raggiunge soltanto una frazione del loro carico di rottura e del loro modulo di elasticità. Ma anche cosí la resistenza specifica e il modulo specifico di resistenza dei compositi superano di gran lunga quelli raggiungibili nei materiali strutturali monolitici quali l'alluminio, l'acciaio e il titanio. I compositi unidirezionali di boro-alluminio e di epossido-grafite, con un contenuto di fibre del 55 per cento, hanno un carico di rottura fra 7700 e oltre 14 000 chilogrammi per centimetro quadrato, una resistenza specifica (la cui unità è il centimetro) fra 5 e 6,35 milioni e un modulo specifico di resistenza (anch'esso in centimetri) compreso fra 900 e 1000 milioni. A titolo di confronto si tenga presente che la resistenza specifica dell'alluminio a elevata resistenza è di appena 1,8 milioni e il suo modulo specifico di circa 250 milioni. È evidente che questi eccezionali valori dei compositi di boro e grafite possono tradursi in notevoli economie di peso.

I compositi a fibra, oltre alle loro superiori proprietà meccaniche, offrono vantaggi rilevanti per la versatilità dei metodi con cui possono essere fabbricati. Uno dei piú vecchi di questi metodi è l'avvolgimento del filamento con il quale le fibre vengono avvolte con continuità su un mandrino della forma desiderata. Comunque il metodo oggi piú largamente adoperato fa uso delle tecniche di formazione multistrato, secondo le quali ogni strato è formato con nastri composti da fibre di grafite o di boro in una matrice costituita da una lamina di resina o di alluminio. Dopo aver raggiunto la forma desiderata vengono applicati calore e pressione per completare il processo di fabbricazione. È evidente che il prodotto finito è un composito laminare le cui lamine sono compositi a fibre. L'ingegnere può adattare la struttura per soddisfare il tipo di sollecitazioni richiesto.

Un altro metodo di fabbricazione fa uso di forme metalliche convenzionali. Secondo questo metodo un nastro composito unidirezionale viene sovrapposto alla superficie dei profilati strutturali o vi vengono inserite delle barre composite. Mediante questo procedimento si è potuta aumentare in modo notevole la rigidità dei profilati di alluminio e conseguire economie di peso fra il 25 e il 60 per cento.

Sono state sviluppate anche tecniche di tessitura tridimensionali per produrre strutture composite isotrope. Il materiale tridimensionale può essere formato secondo una disposizione cubica o cilindrica: in quest'ultimo caso le fibre sono disposte in direzione radiale e assiale e lungo le circonferenze perpendicolari all'asse. Con la disposizione cubica si hanno materiali massicci che possono essere lavorati alla macchina per costruire ingranaggi, cuscinetti o altri pezzi; con quella cilindrica il materiale può essere tessuto direttamente in varie forme come sfere cave, coni ed elissoidi.

I compositi a fibre possono essere ora ottenuti anche per fusione mediante solidificazione unidirezionale di leghe a composizione eutettica, cioè sistemi i cui costituenti cristallizzano tutti alla medesima temperatura minima. Ne sono esempi le leghe di alluminio-nicheliuro di alluminio e niobio-carburo di niobio. Una delle tecniche è del tutto simile alla normale pratica di fonderia usata per ottenere fusioni in una forma a fondo aperto poggiante su una piastra fredda di colata attraverso la quale passa un flusso caldo in direzione verticale. La fusione risultante contiene fibre o « whisker » (fibre preparate sotto forma di singoli sottilissimi cristalli) allineati in direzione longitudinale. La seconda fase, con piú del 30 per cento del volume totale, è costituita da scaglie o piastrine.

Benché sia probabile che il boro e la grafite domineranno ancora per diversi anni il campo dei compositi a prestazioni elevate, un gran numero di altri compositi a fibra potranno trovare applicazioni speciali. Il carburo di silicio depositato su boro, a causa della sua ottima compatibilità con i metalli, offre buone speranze di successo per l'impiego in compositi a matrice metallica con temperature di lavoro fra 815 e 980 gradi centigradi. Il nitruro di boro, un altro candidato per i compositi a matrice metallica, unisce il basso costo della fibra di partenza con una bassa densità e una buona stabilità a temperature elevate. Tuttavia, sia il suo carico di rottura (14 000 chilogrammi per centimetro quadrato) sia il suo modulo elastico (1 400 000 chilogrammi per centimetro quadrato) sono relativamente bassi. Si stanno prendendo in considerazione anche le fibre di ossido di alluminio o zaffiro, estruse con procedimento continuo dalla massa fusa, da impiegare in matrici metalliche o ceramiche per la resistenza alle alte temperature e per la compatibilità chimica che presentano.

Recentemente la E. I. du Pont de Nemours & Company ha presentato una promettente fibra organica conosciuta come PRD 49. Si suppone che chimicamente appartenga alla famiglia

La E. I. du Pont de Nemours ha recentemente introdotto la fibra organica PRD 49 per l'eventuale impiego in compositi a elevata resistenza. Si suppone che il materiale della fibra sia simile al nailon. L'ingrandimento è di 975 diametri.

Questa microfotografia elettronica di un campione di piombo rinforzato per dispersione rappresenta un composito particolato prodotto dalla St. Joe Minerals Corporation. Il materiale è composto di una matrice di piombo rinforzato con una dispersione uniforme ed estremamente fine di ossido di piombo. La presenza delle particelle di ossido impedisce lo sviluppo dei grani cristallini, dando luogo a una struttura a grana fine e di elevata resistenza. L'ingrandimento è di circa 3800 diametri.

dei poliammidi (nailon). La fibra, con un peso specifico di appena 1,45 e un carico di rottura di 37 000 chilogrammi per centimetro quadrato, ha una resistenza specifica superiore al vetro, al boro e alla grafite. Il suo modulo specifico di resistenza è cinque volte quello del vetro ed è elevato quanto quello di alcune fibre di grafite.

Le fibre metalliche con proprietà meccaniche paragonabili a quelle del vetro, della grafite e del boro probabilmente troveranno in futuro applicazioni piú estese. Sono in corso sviluppi per l'applicazione di fibre di tungsteno, nichel, berillio e acciaio da impiegare in elementi strutturali metallici. Possono esservi impieghi potenziali anche maggiori per le fibre metalliche in applicazioni come i dispositivi riscaldati elettricamente, gli elementi di rinforzo per pneumatici e i nastri trasportatori in ambienti ad alta temperatura.

Si ammette generalmente che le fibre che piú si avvicinano ai valori teorici di resistenza sono quelle preparate nella forma di singoli cristalli sottilissimi. Questi cristalli, chiamati « whisker », hanno un diametro compreso fra 3 e 10 micron e un rapporto lunghezza-diametro fra 50 e 10 000. I whisker di alluminio hanno un carico di rottura a trazione che può raggiungere 210 000 chilogrammi per centimetro quadrato, e un modulo di elasticità fino a 4 360 000 chilogrammi per centimetro quadrato. Altri materiali potenziali per whisker sono il carburo di silicio, il nitruro di silicio, il carburo di boro e l'ossido di berillio.

L'impiego dei whisker su vasta scala nei materiali compositi è ancora di là da venire. L'ostacolo maggiore è rappresentato dalla non uniformità dei whisker sia nelle dimensioni sia nelle proprietà meccaniche. Dovranno inoltre essere sviluppate le tecniche pratiche per ordinare e incorporare i whisker nei compositi. Forse la piú ampia applicazione potenziale dei whisker è quale costituente aggiunto nei compositi di fibra continua. Gli studi hanno dimostrato che i whisker migliorano molto la capacità della matrice di trasferire il carico.

Con il progresso della tecnologia saranno sviluppati dei compositi ibridi formati con due o piú tipi di fibre differenti. Ricerche preliminari sulla combinazione di fibre di grafite e di boro in una matrice epossidica hanno dimostrato una superiorità fino al 30 per cento dell'ibrido, per quanto riguarda il modulo di elasticità e il carico di rottura, rispetto ai compositi epossidici di boro convenzionali.

Cosa avverrà nel futuro? Quantunque la grande maggioranza degli impieghi comuni dei moderni compositi sia in tecnologie sofisticate, si sta avvicinando rapidamente il momento nel quale i compositi a elevate prestazioni faranno la loro comparsa in applicazioni piú usuali. Si sta seriamente valutando, per esempio, l'uso di compositi di grafite in apparecchiature di processo, in cuscinetti autolubrificanti e in commutatori di sicurezza e collettori per dinamo. In Gran Bretagna i compositi a fibra di grafite sono già usati nei macchinari tessili. Un'applicazione nei telai per tessitura, costituita da strisce di compositi su alluminio, ha reso possibile di aumentare del 50 per cento la velocità dei telai stessi.

Attualmente una delle principali limitazioni per l'uso piú esteso dei moderni compositi è l'alto prezzo delle fibre costituenti. Le fibre di boro in nastro costano oggi fra 170 000 e 350 000 lire al chilogrammo. Il filato di grafite in nastro impregnato di resina è generalmente disponibile a prezzi fra 95 000 e 115 000 lire al chilogrammo a seconda della quantità acquistata. Si può prevedere, come è usuale, che i prezzi possano diminuire all'aumentare della domanda. Per esempio si valuta che, se la richiesta di fibre di boro raggiungesse 50 000 chilogrammi annui (come alcuni prevedono che possa avvenire fra il 1975 e il 1980), il prezzo scenderebbe a cifre comprese fra 65 000 e 100 000 lire al chilogrammo. Per il 1975 si prevede una produzione di fibre di grafite intorno a 160 000 chilogrammi, mentre il prezzo dovrebbe scendere fra 30 000 e 65 000 lire al chilogrammo.

Quando si prendono in considerazione le differenze di prezzo fra i compositi e i materiali semplici, un punto che viene talvolta trascurato è che spesso i compositi richiedono una minore quantità di materiale. Per esempio, nel caso di un componente di aeroplano, da un profilato speciale di alluminio del peso di 1815 chilogrammi si otteneva, dopo la lavorazione, una parte finita del peso di 198 chilogrammi. Per lo stesso componente realizzato con un composito di boro erano sufficienti solo 103 chilogrammi di materiale grezzo per fabbricare la parte finita del peso di 94 chilogrammi.

I compositi sembrano destinati a un futuro brillante, ma è necessario eseguire ancora moltissimo lavoro prima che essi possano raggiungere una buona parte del loro intero potenziale. Come per tutti i materiali da costruzione, per fare il migliore uso dei compositi si deve poterne caratterizzare quantitativamente le proprietà e prevedere con precisione e sicurezza il comportamento in esercizio.

In questa sequenza di microfotografie elettroniche a scansione con ingrandimenti crescenti, è evidente la struttura irregolare di un composito eutettico sperimentale sviluppato dalla General Electric. Il materiale delle fibre è, in questo caso, carburo di tantalio, mentre la lega usata per la matrice, a cui è dovuta la forma caratteristica delle fibre, è cobalto puro.

Nuovi orizzonti nel rilievo e nel controllo dei monumenti

Il contributo della fotogrammetria e della elaborazione elettronica dei dati nella conservazione dei monumenti architettonici

di Mario Fondelli e Francesco Greco

La protezione dell'ambiente naturale e la conservazione dei monumenti storici e dei beni culturali, sono divenuti oggi problemi di grande interesse e di viva attualità.

La necessità di intervenire, in maniera responsabile, per salvaguardare e conservare il nostro prezioso patrimonio naturale e culturale sta divenendo infatti sempre più urgente, di fronte agli effetti del progressivo depauperamento di questo patrimonio e dei turbamenti indotti dalla vita moderna.

L'allarme in questo campo non è comunque di epoca molto recente, specialmente per quanto concerne i monumenti e i beni culturali. Praticamente, esso si perde nella stessa memoria dell'uomo, che lo ha talvolta registrato con toni altamente drammatici, soprattutto quando la stessa convivenza civile è stata minacciata o sconvolta da eventi bellici o da calamità naturali eccezionali.

Gli avvertimenti e le raccomandazioni che quest'allarme ha di volta in volta suscitato sono però, purtroppo, caduti più di una volta nel vuoto.

Varie iniziative si sono susseguite, a questo proposito, anche in epoca recente, specialmente tra il 1907 e il 1938, per trovare una base di accordo internazionale circa la protezione dei monumenti e dei beni culturali in caso di eventi bellici. Gli esiti che queste iniziative hanno sortito non hanno comunque impedito che, proprio durante l'ultimo conflitto, molti monumenti e molti beni culturali venissero distrutti o irrimediabilmente danneggiati.

Conclusa la guerra, è stato compito dell'UNESCO risollevare tutta la questione e predisporre, in tal modo, le premesse indispensabili per una convenzione internazionale, stipulata poi a L'Aja il 14 maggio 1954, circa la protezione dei monumenti storici e dei beni culturali in caso di conflitto armato. Una convenzione, questa, molto importante nella storia dell'umanità e che, finora, ha raccolto l'adesione di ben 64 diversi paesi.

Logicamente, ogni paese ha il dovere di proteggere il proprio patrimonio culturale per consentirne la miglior fruizione a tutti i suoi abitanti e per trasmetterlo alla posterità. Per le parti contraenti la « Convenzione de L'Aja », la protezione di questo patrimonio è anche un obbligo di diritto pubblico internazionale.

Nella « Convenzione de L'Aja » la nozione di patrimonio o bene culturale è stata definita in termini molto ampi, tali cioè da comprendervi sia i monumenti storici e artistici che i luoghi di interesse archeologico o storico, sia tutti gli oggetti mobili aventi particolare valore storico o artistico.

La protezione dei beni culturali viene essenzialmente realizzata, com'è noto, attraverso il rispetto di tali beni e la loro avveduta salvaguardia.

Il rispetto di questi beni è compito, in tempo di guerra, degli eserciti belligeranti. La salvaguardia è invece diretto dovere, in tempo di pace, dei loro legittimi proprietari o conservatori.

È comunque opportuno notare, a questo punto, che non sono soltanto i conflitti armati a mettere in serio pericolo i nostri beni culturali, ma è soprattutto la nostra indifferenza, o incuria, a comprometterne maggiormente nel tempo lo stato di conservazione. L'imperizia aggrava poi, in taluni casi specifici, l'usura operata dai secoli.

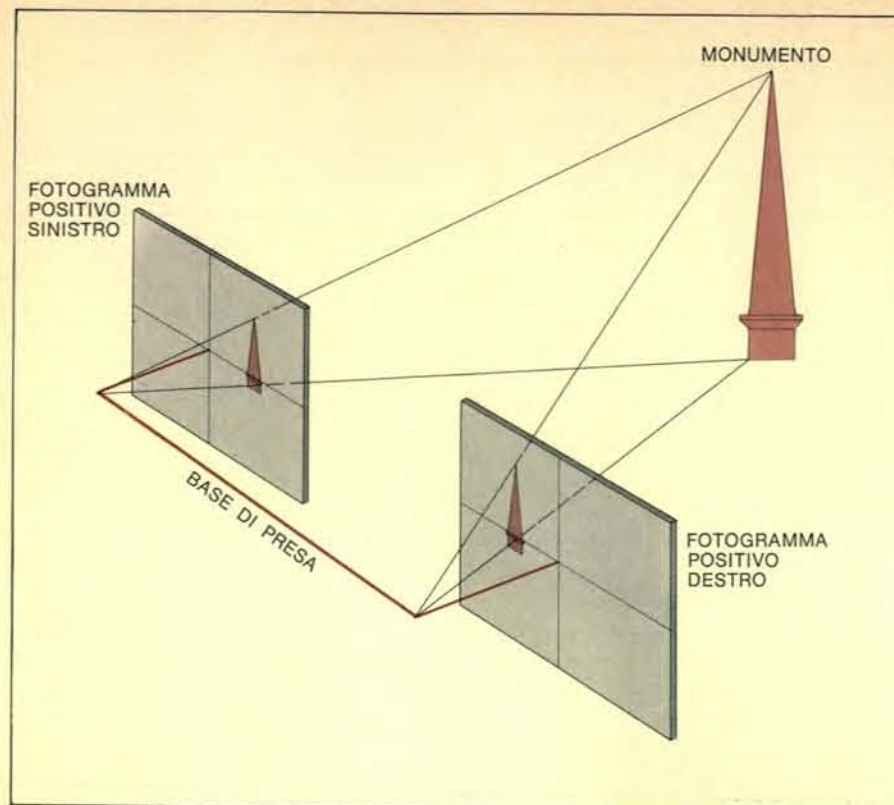
Il miglior modo di salvaguardare i beni culturali è anzitutto quello di inventariarli con la maggior cura possibile, documentandoli nei più minuti particolari, per agevolare in prosieguo di tempo l'opera di un eventuale restauro, per facilitarne la ricostruzione dopo la distruzione, nonché per trasmetterne ai posteri la memoria con la storia della loro evoluzione.

Servono a questo specifico scopo: le notizie storiche reperibili intorno a ciascuno di questi beni culturali, i documenti di archivio che lo descrivono o lo riguardano, gli schizzi e i disegni che lo illustrano, le piante e i prospetti, le sezioni, le fotografie e i rilevamenti fotogrammetrici degli elementi strutturali che lo definiscono, le analisi delle caratteristiche tecniche dei materiali che concorrono alla sua realizzazione. Fattori questi, in varia misura, indispensabili per assicurare il miglior restauro o la più fedele ricostruzione, a distanza di tempo, di un monumento o di un qualunque altro bene culturale.

In verità, è proprio la fotografia il mezzo più idoneo e più sicuro per la documentazione di un monumento o di un bene culturale.

L'uomo interpreta sotto l'influenza della sua sensibilità e della sua epoca, la macchina fotografica registra l'insieme e denuncia, allo stesso tempo, con obiettività e fedeltà ogni dettaglio e ogni sfumatura. La fotografia risulta pertanto un mezzo di documentazione di primissimo ordine e di vitale importanza nel campo della conservazione dei monumenti e dei beni culturali.

Ma una tale documentazione, sia essa ricca quanto più possibile, non può

Le prese fotogrammetriche per il rilevamento della copertura esterna della Cupola di Santa Maria del Fiore sono state effettuate nel pomeriggio del 6 marzo 1969 utilizzando un fototeodolite FTG. Le prese sono state effettuate con base verticale, facendo stazione sul Campanile di Giotto in corrispondenza del ballatoio di sommità e del ballatoio della cella campanaria. La base verticale è risultata lunga 25,56 metri.

È noto come una fotografia, ottenuta in particolari condizioni attraverso una macchina munita di obiettivo privo di aberrazioni, non rappresenti altro che una proiezione centrale dell'oggetto ritratto. È su questo elemento fondamentale, il fotogramma, che si basa tutta la moderna tecnica del rilevamento topografico e non topografico. Date due distinte macchine immaginiamo ora di poter fotografare con esse uno stesso oggetto da due punti di vista differenti, posti a una certa distanza (*base*) l'uno dall'altro, e di ottenerne cosí due immagini fotografiche. La ricostruzione per proiezione delle due stelle di raggi che, uscenti dall'oggetto, hanno impressionato le due lastre permetterà di ricostruire il modello e di trarne la sua rappresentazione grafica o numerica.

soddisfare appieno chi si interessa alla conservazione e al restauro dei monumenti e dei beni culturali a tre dimensioni. Senza sottovalutare il valore della fotografia, per lui, la documentazione essenziale di un bene culturale di questo tipo sarà sempre costituita da una levata precisa comprendente: la pianta, i prospetti, le sezioni, ecc. Sono questi, infatti, i documenti che, soprattutto, forniscono meglio la visione netta, precisa e tecnica di un monumento, nella sua reale disposizione e nelle sue particolarità strutturali.

È allora la *fotogrammetria a corta distanza* che contribuisce alla miglior soluzione del problema della documentazione e del rilevamento dei monumenti ai fini della loro conservazione e del loro restauro. L'impiego della fotogrammetria permette infatti di raggiungere nelle levate una precisione di gran lunga superiore a quella fornita dai normali metodi di misura diretta, o dal semplice impiego delle fotografie documentarie.

L'applicazione della fotogrammetria nel rilevamento dei monumenti architettonici conta ormai più di un secolo di vita. Essa è all'origine degli sviluppi della fotogrammetria medesima e numerosi si contano oggi gli esempi di quest'applicazione nella documentazione e nello studio di monumenti e di opere d'arte. I tecnici e gli specialisti sono ormai tutti concordi nel riconoscere la validità del contributo offerto in questo campo dal metodo fotogrammetrico.

Ma le prospettive che la fotogrammetria dischiude alla conservazione e al restauro dei monumenti vanno ancora oltre questa semplice e unanime constatazione. Essa può offrire agli studiosi e ai conservatori dei monumenti un contributo ben più prezioso allorché venga applicata in accordo con l'*elaborazione elettronica* dei dati osservati.

L'applicazione in sequenza, nello studio e nel rilevamento di un qualsiasi monumento, del metodo fotogrammetrico e della elaborazione automatica dei dati osservati può infatti consentire di evidenziare, per il monumento in esame, caratteristiche geometriche e strutturali mai prima sospettate, di grande interesse e significato per la sua interpretazione storico-architettonica, per la sua conservazione o per il suo eventuale restauro.

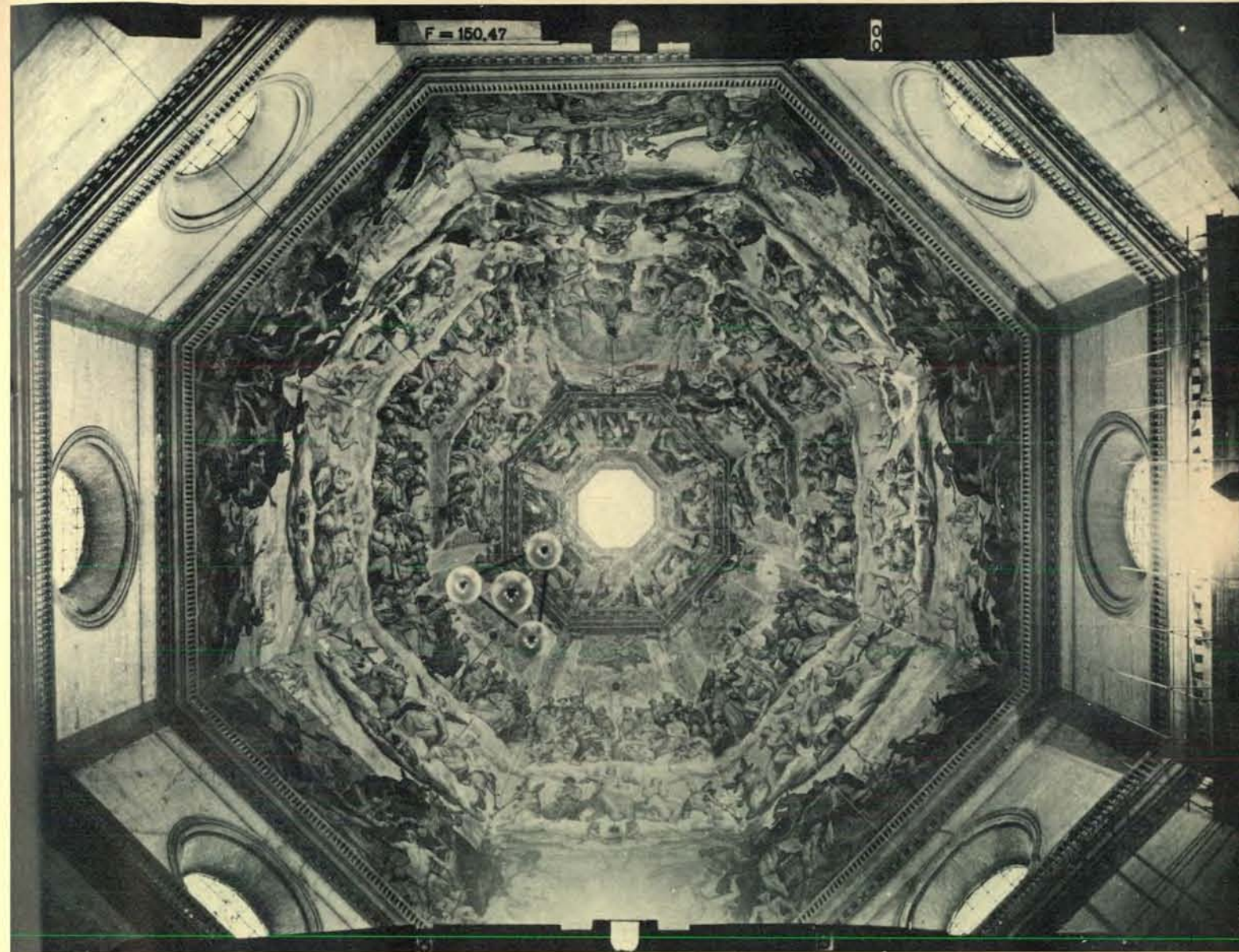
L'esemplificazione pratica delle possibilità offerte da queste due differenti, ma congruenti, prassi operative può essere ottenuta, in particolare, dal recente rilevamento fotogrammetrico della cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze e dalle ricerche analitiche che ne sono scaturite.

Uno studio sperimentale, questo della Cupola del Brunelleschi, compiuto presso la Facoltà di ingegneria dell'Università degli studi di Firenze, con la collaborazione delle Officine Galileo e del Centro scientifico di Pisa della IBM-Italia, per verificare le reali possibilità dei metodi fotogrammetrici nel rilevamento grafico e numerico di grandi opere architettoniche, com'è appunto il caso della cupola in oggetto, e per studiare la metodologia più idonea per un impiego sistematico dell'elaborazione elettronica nello studio e nella conservazione dei monumenti.

E questo, soprattutto, nell'intento di contribuire al perfezionamento delle cognizioni e della documentazione tecnica relative a questo monumento, tuttora oggetto di vive preoccupazioni da parte dei suoi conservatori.

Com'è noto, questa cupola ha iniziato a lesionarsi circa un secolo dopo il suo compimento. Le modalità con cui si sono verificate le lesioni sembrano escludere una deficenza statica che, logicamente, avrebbe dovuto manifestarsi al compimento della sua costruzione, e mai a distanza di circa un secolo.

Ricerche sperimentali, effettuate tra il 1936 ed il 1937, hanno consentito di correlare l'entità di tali lesioni con le variazioni termiche ambientali, giornaliere e stagionali. Le fessurazioni, aprendosi e chiudendosi regolarmente, tendono però coll'andar del tempo ad un progressivo allargamento.

La gravità di questo fenomeno è stata messa in evidenza da Pier Luigi Nervi che, membro di una apposita Commissione di studio, non ha mancato di rilevare la drammaticità della situazione osservata e, nel 1945, ha testualmente affermato: « qualora non si riesca a trovare un efficace rimedio al progressivo allargamento dei cretti, e questo proceda anche con frazioni di millimetro ogni anno, in un periodo di altri due o trecento anni la deformazione avrà raggiunto tali valori, da rendere precaria la stabilità statica vera e propria ». E dal 1945 a oggi niente è stato ancora fatto per arginare questo preoccupante fenomeno.

La presa dei fotogrammi relativi al rilevamento della volta interna della Cupola di Santa Maria del Fiore è stata effettuata con una bicamera Veroplast dal presbiterio del Duomo fiorentino, nel pomeriggio del 12 novembre 1968 in particolari condizioni di illuminazione naturale dell'ambiente. La foto presenta uno dei due fotogrammi zenitali presi in questa occasione. Come si vede, l'insieme architettonico è stato compreso tutto in un unico stereogramma risultato poi alla scala media di 1:400.

Numerosi sono risultati nel corso dei secoli gli studi che hanno avuto per oggetto questo monumento, a partire dalle misure richieste da Michelangelo Buonarroti nel 1547, allora architetto capo della fabbrica di San Pietro in Roma.

Nonostante tutto questo fiorire di ricerche e di studi storici, la letteratura tecnica specializzata offre però ancora ben poche notizie sicure sulle caratteristiche geometrico-strutturali di questa cupola fiorentina, ai fini specifici della sua conservazione nel tempo.

L'applicazione dei metodi fotogrammetrici e l'utilizzazione dell'elaboratore elettronico nella descrizione e nello studio della cupola del Brunelleschi non erano mai state tentate finora. Tentarle avrebbe potuto consentire di pervenire a dei risultati molto più attendibili di quelli ottenuti dalle lacunose ricostruzioni storiche compiute anche nel più recente passato.

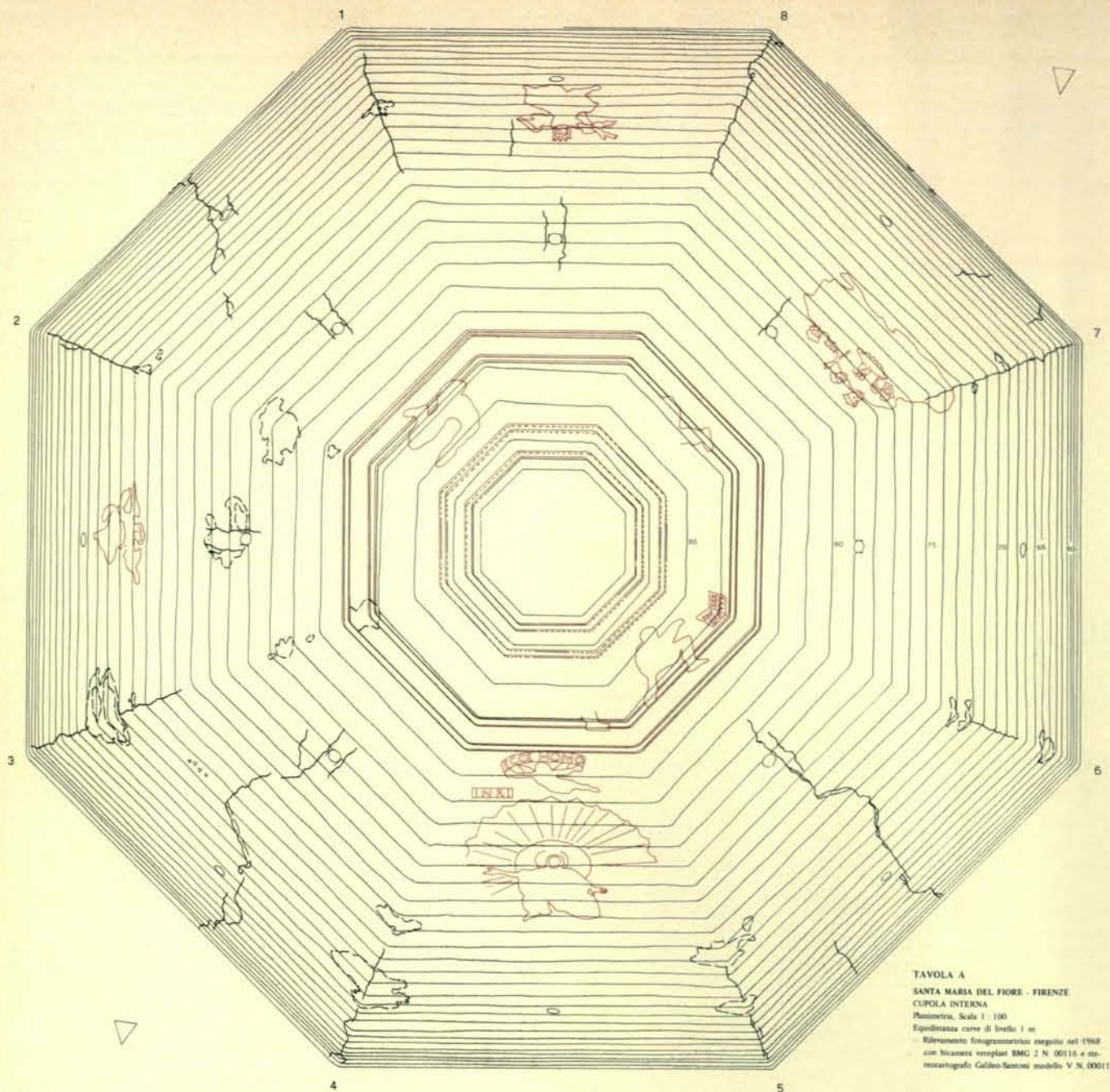
Inoltre, il confronto critico degli elaborati e dei risultati ottenuti con queste nuove ricerche sperimentali, avrebbe poi permesso di saggiare il grado di affidabilità da attribuire a queste moderne tecniche di rilevamento e di controllo dei monumenti.

Il rilevamento fotogrammetrico dei monumenti architettonici non presenta in sé alcuna difficoltà. Particolarmente delicata è però l'opera del rilevatore, che deve operare in maniera da non tralasciare alcuna sfumatura, capace di caratterizzare l'opera d'arte da rilevare e studiare.

Prima di dare inizio alle prese fotogrammetriche, avvalendosi della consulenza di un esperto, egli deve effettuare una minuziosa ricognizione all'opera medesima, allo scopo di armonizzare le differenti operazioni di presa fotogrammetrica con quelle relative alla semplice presa fotografica documentaria, necessarie per agevolare la *lettura*, se non proprio l'*interpretazione*, dell'opera in esame durante la restituzione fotogrammetrica.

Per legare, in sede di restituzione, le varie prese è necessario poi determinare la posizione topografica dei punti di presa fotogrammetrica e di altri opportuni punti prescelti sul monumento, e aventi funzione di controllo, in un sistema di riferimento che comprenda tutta l'opera da rilevare.

TAVOLA A

SANTA MARIA DEL FIORE - FIRENZE
CUPOLA INTERNA
Planimetria. Scala 1 : 100
Equidistanza curve di livello 1 m
- Rilevamento fotogrammetrico eseguito nel 1968 con bicamera veroplast BMG 2 N. 00116 e stereocartografo Galileo-Santoni modello V N. 00011.

La rappresentazione grafica in scala ridotta della volta della Cupola di Santa Maria del Fiore, come è stata ottenuta dalla restituzione delle prese compiute dal presbiterio del Duomo fiorentino il 12 novembre 1968. Nella figura l'equidistanza delle curve di livello corrisponde a 1 metro. Come si può vedere da questo disegno, il rilevamento fotogrammetrico ha consentito di rappresentare tutte le antiche e vecchie fratture della struttura in vista, e i più recenti distacchi d'intonaco della volta affrescata.

Questo, talvolta, non può essere sempre possibile, a causa specialmente dell'ubicazione dell'opera medesima.

Sarà allora opportuno fare appello ai procedimenti già sperimentati nella fotogrammetria aerea, per ricavare a posteriori, nella restituzione, gli elementi indispensabili all'orientamento assoluto dei modelli. In effetti, ogni opera architettonica comporta sempre degli elementi strutturali atti a ristabilire l'orientamento stesso.

Nel caso specifico del rilevamento della cupola di Santa Maria del Fiore, le operazioni di presa fotogrammetrica sono state semplificate al massimo.

La presa dei fotogrammi relativi alla volta interna della Cupola, è stata effettuata direttamente dal presbiterio del Duomo fiorentino tramite una bicamera. L'insieme architettonico è stato compreso in un unico stereogramma.

Molto più laboriose sono risultate invece, al confronto, le operazioni di presa fotogrammetrica per il rilevamento della copertura esterna della cupola. Questo, soprattutto, per la difficoltà di reperire intorno al Duomo fiorentino dei punti di presa fotografica capaci di assicurare, date le apparecchiature di restituzione disponibili, la miglior rappresentazione grafica e numerica dell'intera cupola esterna.

In verità, dopo numerose prove compiute tutte senza molto successo, facendo stazione prima sulla terrazza di

MONUMENTO DA RILEVARE O DA CONTROLLARE

MISURE DIRETTE

PRESA FOTOGRAMMETRICA

COPPIA STEREOSCOPICA DI FOTOGRAMMI

FOTOINTERPRETAZIONE

RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA

RAPPRESENTAZIONE GRAFICA (PIANTE, PROSPETTI, SEZIONI, ETC.)

RAPPRESENTAZIONE NUMERICA PER PUNTI DISCRETI (IN COORDINATE SPAZIALI X, Y, Z)

ALTRI DATI OSSERVATI

MODELLO NUMERICO DEL MONUMENTO

IPOTESI DA VERIFICARE E CONTROLLI

INTERPRETAZIONE GEOMETRICA E STATICA DEL MONUMENTO PER LA CONSERVAZIONE E IL RESTAURO

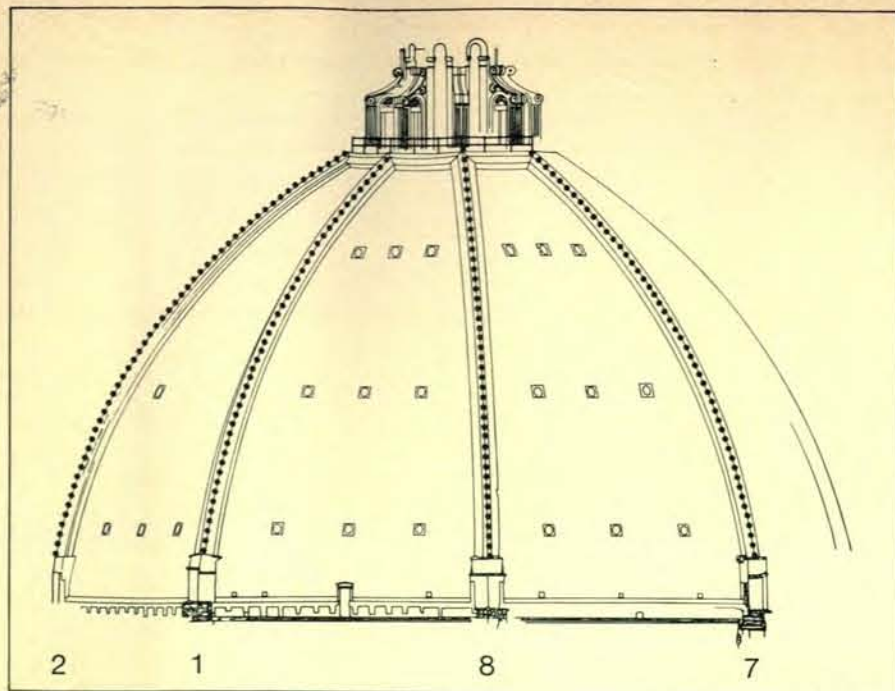
Lo schema operativo che realizza il rilevamento fotogrammetrico e l'elaborazione automatica dei dati osservati richiede una stretta collaborazione tra i diversi specialisti interessati alla documentazione dei monumenti architettonici ai fini del loro studio e della loro conservazione. Il rilievo e il controllo dei monumenti sono più efficaci se tutte le informazioni storiche e tecniche che risultano essere disponibili possono essere raccolte in una banca di dati o in un archivio tecnico centralizzato.

un edificio adiacente al Duomo e poi sul ballatoio di sommità del campanile di Giotto, l'esperienza raccolta ha consigliato di limitare, almeno all'inizio, le operazioni di presa soltanto a una porzione della cupola esterna realizzando a tal fine una base di presa verticale, facilmente situabile sul campanile di Giotto medesimo, tra il ballatoio di sommità e il ballatoio della cella campanaria.

Le prese fotogrammetriche definitive sono state effettuate pertanto realizzando una base di presa verticale, e utilizzando a tal fine un fototeodolite.

La restituzione fotogrammetrica di tutte le prese effettuate, quelle relative alla volta interna affrescata e quelle relative alla copertura esterna, è stata compiuta tramite uno stereocartografo modello *V*, un apparato stereorestitutore analogico studiato e realizzato per l'esplorazione di modelli ottici a grande scala.

Le operazioni per la restituzione delle due differenti prese, quella interna e quella esterna, si sono svolte regolarmente, senza difficoltà di rilievo.

Essendo però venuto a mancare, almeno in un primo momento, l'indispensabile appoggio dei due differenti stereogrammi su punti del monumento topograficamente noti, nel sistema spaziale di riferimento terrestre, l'orientamento assoluto dei relativi modelli ottici è stato effettuato, nel corso della

Il prospetto in scala della Cupola del Brunelleschi ottenuto con la restituzione fotogrammetrica delle prese fotografiche effettuate dal Campanile di Giotto. Sul prospetto è rappresentata la dislocazione schematica delle quattro serie di punti restituiti numericamente per lo studio dei profili di estradosso dei costoloni meridiani della Cupola.

restituzione, orizzontando e riportando in giusta grandezza alcuni elementi strutturali del monumento, sottoposti preventivamente a misura diretta.

La restituzione fotogrammetrica delle prese relative alla cupola interna ha consentito di ottenere, per la prima volta, una rappresentazione grafica della volta affrescata in scala 1 : 50, con curve di livello equidistanziate di 1 metro, e di eseguire alcune sezioni trasversali della stessa volta a identica scala. Effettuando la rappresentazione grafica a curve di livello della volta, si è provveduto inoltre alla restituzione di tutte le lesioni antiche e recenti, rilevabili sul manufatto all'epoca della presa fotogrammetrica, interessanti la struttura vera e propria della cupola o interessanti soltanto l'intonaco affrescato.

Conclusa la rappresentazione grafica, si è provveduto in seguito alla restituzione numerica, in coordinate cartesiane tridimensionali (*X*, *Y*, *Z*), di punti discreti distribuiti uniformemente sulle intersezioni interne delle vele e lungo la mezzaria delle facce.

La restituzione fotogrammetrica delle prese esterne, compiute dal campanile di Giotto con base verticale, è stata effettuata anch'essa in due fasi distinte e successive.

Nella prima fase si è provveduto all'esecuzione di un prospetto della cupola esterna alla scala 1 : 50. Nella seconda fase, si è provveduto invece alla restituzione numerica, in coordinate cartesiane tridimensionali, di quattro distinte serie di punti discreti situati sul profilo di estradosso relativo ai quattro costoloni meridiani della cupola visibili dal campanile di Giotto.

Non v'è dubbio che la parte più importante e più originale delle diverse determinazioni rese possibili dai metodi fotogrammetrici è rappresentata soprattutto dai valori numerici che riferiscono, ordinatamente, la posizione spaziale di queste diverse serie di punti discreti osservati sulla volta interna e sulla copertura esterna della cupola fiorentina.

È infatti evidente che la rappresentazione in coordinate spaziali *X*, *Y*, *Z* di punti discreti relativi ai suddetti elementi geometrico-strutturali apre nuove possibilità allo studio e alla conservazione del monumento medesimo. Il suo studio e le necessarie comparazioni di controllo possono essere agevolmente compiute direttamente su di un suo fedele modello tridimensionale in vera grandezza e non più tramite le sue rappresentazioni grafiche convenzionali (piante, prospetti, sezioni, ecc.) che ne forniscono, comunque si operi, delle limitate visioni parziali.

Ma le prospettive che può dischiudere una rappresentazione numerica di questo tipo vanno ancora oltre queste semplici constatazioni, allorché si ponga mente alle possibilità insite nell'elaborazione elettronica dei dati osservati, con i suoi più attuali e più perfezionati strumenti.

Invero, l'elaborazione automatica dei dati si rivela ricca fin dall'inizio, in questo campo, di grandi prospettive e sviluppi. Il suo contributo può risultare infatti molto prezioso già nella prima fase dei rilevamenti. Le diverse determinazioni topografiche e fotogrammetriche sono di norma influenzate dagli errori di osservazione e i rilevamenti si presentano quindi come problemi di marcata natura statistica. L'ausilio fornito dall'elaborazione automatica nell'indagine statistica è troppo noto per essere ricordato.

Proseguendo nell'analisi, ben più importante e più originale appare pertanto il contributo che l'elaborazione automatica è in grado di offrire al trattamento analitico delle osservazioni compiute durante i rilevamenti o alla loro conclusione, per l'approfondimento analitico delle cognizioni relative alla geometria o alla statica di un monumento, nonché, più propriamente, per il suo sistematico controllo nel tempo ai fini precipui della conservazione vera e propria.

Un controllo, quest'ultimo, che può essere reso agevole e immediato grazie soprattutto alla realizzazione di un apposito archivio elettronico di informazioni tecniche sul monumento medesimo, capaci di descriverne l'intimo comportamento nel tempo e nello spazio. Un archivio cioè che ne realizzi un singolare e prezioso « modello numerico integrale ».

Tra le informazioni da memorizzare in quest'archivio sono da ricordare in particolare: l'insieme completo dei diversi dati geometrici che ne descrivono le forme e i volumi, ossia l'insieme delle coordinate spaziali *X*, *Y*, *Z*, nel sistema di riferimento topografico terrestre, corrispondenti ai diversi punti discreti rilevati od osservati sulle intersezioni tra le differenti superfici interne ed esterne, sui costoloni meridiani o in corrispondenza di eventuali fratture o lesioni; le posizioni in coordinate spaziali *X*, *Y*, *Z* delle eventuali postazioni di controllo, ove sono state sistemate eventuali spie, livelle, termometri, estensimetri o sismografi; i differenti valori numerici corrispondenti alle periodiche letture fatte su questi strumenti di controllo; le informazioni relative alle caratteristiche tecniche e chimico-fisiche dei materiali impiegati per la costruzione; le informazioni di carattere statico, strutturale, storico e ambientale.

La creazione di un archivio di questo tipo, la raccolta e l'aggiornamento

L'applicazione dei metodi fotogrammetrici e della elaborazione automatica costituisce, in mano a esperti, uno dei più moderni e potenti strumenti che la conservazione dei monumenti abbia mai conosciuto. Invero, la realizzazione del modello numerico dei monumenti apre nuove prospettive in questo campo. Piante, sezioni, vedute prospettiche da punti di vista fissi o mobili, possono essere ottenute direttamente dall'elaboratore elettronico per via grafica o per visualizzazione immediata su video. Il conservatore del monumento, seduto al terminale, può colloquiare con l'elaboratore elettronico e, attraverso l'uso del modello matematico del monumento, studiare e indagare là dove è più necessario intervenire per la sua salvaguardia o per il suo risanamento.

L'analisi spettrale costituisce oggi uno dei più potenti e più diffusi metodi di ricerca nel campo delle serie temporali. Essa consente infatti di individuare le armoniche che maggiormente contribuiscono alle perturbazioni non accidentali in una serie di questo tipo. L'applicazione di questo metodo nello studio dei profili di intradosso e di estradosso della Cupola brunelleschiana ha consentito di evidenziare l'esistenza su questi profili di ricorrenti discontinuità in altezza. La figura fornisce una rappresentazione dello spettro di potenza relativo al costolone interno numero 5 della Cupola in oggetto. Lo spettro presenta un *peak* alla frequenza di 0,067 cycles/osservazione, che corrisponde ad un periodo di 15 osservazioni. Questo periodo presenta una lunghezza di 7,5 metri, corrispondenti a 12¾ antiche braccia a panno fiorentino.

delle differenti informazioni tecniche, pongono naturalmente dei problemi del tutto analoghi a quelli già risolti per i moderni sistemi informativi aziendali. Le conoscenze raccolte in questo settore, le varie tecniche operative, se non addirittura alcuni programmi applicativi, possono pertanto essere trasferiti in questo specifico campo della conservazione dei monumenti.

Invero, un archivio del genere, unito all'impiego di sistemi interattivi per la elaborazione dei dati, o all'uso di speciali programmi che utilizzano unità speciali (plotter o video) per la emissione dei risultati, come per esempio il GATD (Graphic Analysis of Three-Dimensional Data), è capace di imprimere un dinamismo del tutto nuovo allo studio e alla conservazione dei monumenti. Un dinamismo, cioè, in grado di gestire responsabilmente la vita dei monumenti con interventi tempestivi ed appropriati.

Quest'archivio può fornire sempre, naturalmente all'istante, rappresentazioni grafiche di tipo convenzionale (piante, prospetti, sezioni ecc.) del monumento memorizzato, in grandezza naturale o in scala scelta a piacere. Inoltre, esso è anche in grado di fornire delle viste prospettiche del monumento stesso, ottenute da punti di vista scelti a piacere, fissi o mobili. Il monumento può essere così osservato e studiato in maniera esauriente anche nei più minuti particolari muovendosi, se necessario, all'esterno o nel suo interno.

Analizzando analiticamente e statisticamente i differenti valori numerici archiviati, sarà poi possibile ottenere interessanti informazioni sulle asimmetrie di costruzione insite nel monumento medesimo, sulle caratteristiche geometrico-analitiche di particolari forme strutturali, sull'influenza stilistica subita da altri monumenti coevi o più anziani.

Ma l'impiego più importante del modello numerico del monumento, realizzato con l'archivio suddetto, rimane senz'altro quello del costante controllo del suo stato di conservazione.

L'aggiornamento puntuale e periodico delle differenti informazioni tecniche archiviate è alla base dell'efficienza di questo controllo.

Invero, comparando i valori numerici archiviati in precedenza con quelli ottenuti tramite le più recenti osservazioni, è possibile seguire passo passo l'evoluzione del monumento e ottenere, inoltre, una misura dei cambiamenti di volta in volta intervenuti.

Studiando il progressivo accentuarsi dei cedimenti e delle fessurazioni, analizzando il progressivo estendersi delle

infiltrazioni d'acqua e valutando gli effetti delle variazioni termiche, seguendo l'evolversi dei fenomeni connessi con l'inquinamento atmosferico, studiando gli effetti delle sollecitazioni a carattere dinamico, nonché lo stato delle tensioni interne, sarà infine agevole verificare ipotesi circa la stabilità del monumento e fare anche delle previsioni, per simulazione, circa la soglia di sicurezza che dovrà essere rispettata per garantire al monumento la piú lunga esistenza possibile.

È essenzialmente dal colloquio tra esperto del monumento ed elaboratore elettronico che, anche in questo caso, possono essere compiute le scelte migliori e possono essere inoltre decisi gli interventi più idonei alla salvaguardia e alla conservazione del monumento cosí documentato.

È tuttavia soltanto su alcuni dei più evidenti aspetti dell'elaborazione automatica dei dati, che è stata finora fissata l'attenzione delle ricerche analitiche, nell'interpretazione delle osservazioni compiute sulla cupola di Santa Maria del Fiore.

Il primo problema che si è tentato di risolvere è stato infatti quello di individuare, in termini analitici, la forma geometrica delle intersezioni interne delle vele, delle mezzerie delle facce interne delle vele medesime e dei profili di estradosso della cupola in argomento.

Come elementi di partenza per questa ricerca geometrica, sono state utilizzate le coordinate spaziali X, Y, Z delle diverse serie di punti discreti osservati ordinatamente sui profili suddetti e rilevati con i metodi fotogrammetrici.

Queste coordinate spaziali sono state in seguito trasformate, profilo per profilo, in coordinate piane R, Z per semplificare la ricerca geometrica medesima. A tal fine, sono stati assunti come elementi di riferimento: il piano del pavimento interno del Duomo fiorentino (piano XY) e l'asse medio di simmetria della cupola in oggetto (asse delle Z).

Studiando i valori numerici di partenza per queste trasformazioni, è stato intanto possibile rilevare subito una accentuata irregolarità nei lati dell'ottagono di base della cupola ed una leggerissima inclinazione (circa 16') della costruzione medesima verso sud-est.

Tenendo poi presenti le testimonianze storiche favorevoli, com'è noto, a una cupola « di dentro lunga a misura di quinto acuto negli angoli », la ricerca della forma geometrica dei profili esaminati è stata circoscritta alle curve della famiglia delle coniche.

Il problema della determinazione delle caratteristiche geometriche di questi profili è stato così ricondotto a un semplice problema di « curve fitting » nel piano cartesiano RZ, considerando a tal fine l'equazione canonica con sei coefficienti, equazione che ha condotto poi allo schema di « fit » semplificato a cinque coefficienti essendo possibile dividere ciascun termine dell'equazione canonica per un coefficiente che risulta diverso da zero per il particolare sistema di riferimento adottato.

I risultati che sono stati ottenuti, elaborando automaticamente i valori numerici suddetti, hanno concordemente messo in evidenza, tra la varietà delle quattro curve coniche possibili (circonferenza, ellisse, iperbole e parabola), una marcata preferenza per l'ellisse. Una preferenza, questa, che sta soprattutto a indicare una ben marcata variazione della curvatura lungo i diversi profili esaminati.

Ma l'interesse maggiore di tutte queste ricerche geometriche non sta tanto nell'aver constatato questa curvatura variabile e nell'aver fatto poi disegnare dall'elaboratore elettronico la curva di « best fitting » relativa ai valori numerici osservati, quanto nell'aver avuto la possibilità di comparare statisticamente i profili medesimi per rilevare se essi si differenziavano o no significativamente tra di loro, e se questa differenziazione poteva essere riconnessa con le asimmetrie di base prima riscontrate.

Questa indagine è stata effettuata calcolando, per ogni serie di valori osservati, l'*autocovarianza* e la *funzione dello spettro* relative ai residui ottenuti confrontando i dati sperimentali con quelli derivabili dalla curva di « best fitting ». Calcoli, quest'ultimi, resi possibili dalla constatazione che i punti osservati sui profili studiati erano stati regolarmente intervallati in altezza sui profili medesimi.

Le indicazioni che sono state ottenute da queste ricerche statistiche hanno consentito di rilevare l'esistenza, sulla cupola esaminata, di ricorrenti discontinuità in altezza, denunciate dalla presenza di una componente periodica ogni 15 osservazioni. Un periodo corrispondente a intervalli ricorrenti in altezza ogni 7,5 metri, o meglio ancora, ogni 12¾ antiche « braccia a panno fiorentine ».

Questa discontinuità potrebbe essere facilmente ricollegata alla variazione delle caratteristiche tecniche dei materiali impiegati nella costruzione della cupola o, eventualmente, con i diversi stadi costruttivi in cui fu realizzata.

È di per sé evidente, a questo punto, l'importanza che queste nuove tecniche operative assumono nel documentare un'opera d'arte architettonica, ai fini precipui di un suo nuovo e più approfondito studio o di un suo eventuale restauro nel tempo.

Invero, le indicazioni ottenute circa la variazione della curvatura lungo i profili di intradosso e di estradosso e l'accertata esistenza di ricorrenti discontinuità in altezza sui profili stessi, sono suscettibili di promuovere tutto un nuovo discorso critico intorno a questa cupola, e intorno, soprattutto, alle conoscenze matematiche, statiche e meccaniche del suo insigne autore.

Queste informazioni dovrebbero poi contribuire in maniera completamente nuova alla ricostruzione oggettiva delle speciali tecniche costruttive impiegate, all'epoca, per la sua realizzazione.

È fuori dubbio che l'introspezione dei monumenti, avviata in questo modo dai metodi numerici fotogrammetrici e dalla elaborazione elettronica dei dati, non mancherà certo d'influenzare criteri e metodi di ricerca già da tempo stabilizzati nei campi della critica architettonica e della conservazione dei monumenti. Senza togliere, con questo, valore e credibilità alle ricerche storico-architettoniche intraprese da tempo, da parte di numerosi studiosi, intorno a questo e intorno ad altri importanti monumenti del nostro passato.

Logicamente, la fotogrammetria e l'elaborazione automatica dei dati non potranno mai sostituire l'opera preziosa dello storico dell'arte o del conservatore dei monumenti. Le indicazioni che esse possono fornire a questi studiosi, intorno a un monumento o a un'opera d'arte, sono però suscettibili di perfezionare le loro ricerche e le loro interpretazioni, a tutto vantaggio di una fruizione molto più coerente e molto più appropriata di tale bene culturale.

Invero, il modello numerico dei monumenti e le possibilità interattive dei nuovi elaboratori elettronici con i loro terminali più sofisticati, come il plotter e il video, aprono prospettive così nuove, nel campo della conservazione e del restauro dei monumenti, che sfuggono, almeno a un primo affrettato esame, anche ai più aggiornati e più preparati cultori della materia.

Esse ci consentono comunque di sperare che in un prossimo immediato futuro sia possibile risolvere il grave problema che ci preme: quello di salvaguardare il nostro patrimonio culturale per tramandarne intatta la memoria ai nostri posteri.

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Perché** la longa manus **della coincidenza non è di solito così lunga come sembra.

Non preoccuparti. Il fulmine non colpisce mai due volte nello stesso posto.
BILLY BEE

Dall'inizio della storia umana, coincidenze insolite hanno rafforzato la convinzione dell'esistenza di forze occulte che influirebbero sulla nostra vita. Eventi che sembravano violare miracolosamente le leggi della probabilità venivano attribuiti alla volontà di dei o demoni, a Dio o a Satana, o almeno a leggi misteriose, ignote alla scienza e alla matematica.

D'altra parte pensatori scettici hanno sostenuto che nei grovigli inconcepibilmente intricati della storia umana, con miliardi e miliardi di eventi che si dispiegano ogni secondo in tutto il mondo, la situazione è in realtà diametralmente opposta. È sorprendente il fatto che non si dia pubblicità a coincidenze *più* strane.

« La vita – scrisse G. K. Chesterton – è piena di un influsso incessante di piccole coincidenze... È ciò a conferire una terribile plausibilità a tutte le false dottrine e alle mode perverse. Su qualunque cosa esiste sempre il sostegno di argomentazioni a favore. Se io dicessi a un certo punto che la verità storica viene detta in generale da uomini dai capelli rossi, non ho dubbi sul fatto che una riflessione di dieci minuti (nella quale mi rifiuto di indulgere) mi fornirebbe un elenco considerevole di casi a sostegno ».

« Ci imbattiamo in ripetizioni e precisazioni banali – continua Chesterton – a ogni piè sospinto, ma esse sono così banali che si evita perfino di parlarne. Un uomo di nome Williams entrò in una strana casa e assassinò un uomo di nome Williamson... ».

L'improbabile, diceva Aristotele, è estremamente probabile. In ogni caso la maggior parte delle coincidenze non viene sicuramente riconosciuta. Per esempio, se la targa di una macchina che si trova esattamente davanti a voi desse, leggendo i numeri all'indietro, il vostro numero di telefono, ve ne accorgereste? Chi, tranne un numerologo o un logofilo si renderebbe conto del fatto che le lettere *U, S, A* sono collocate in modo simmetrico in LO*U*I*S*I*A*NA o alla fine di JOHN PHILIP SO*USA*, il nome del compositore delle più grandi marce patriottiche americane? Fa una strana impressione scoprire che Newton nacque lo stesso anno della morte di Galileo o che Bobby Fischer è nato sotto il segno dei Pesci (Fish, in inglese). Ci sono altre due ragioni per cui le coincidenze strane vengono raramente riconosciute. Quando si osserva una coincidenza banale è facile dimenticarla, e quando una coincidenza è abbastanza notevole da essere ricordata si può esitare talvolta a parlarne nel timore di passare per superstiziosi. Gli scettici ritengono che, pur tenendo presente tutto questo, il numero di coincidenze sorprendenti che si presentano continuamente come il risultato di normali leggi statistiche è molto maggiore di quanto gli occultisti possano pensare.

L'antica opinione che molte coincidenze siano troppo improbabili per essere spiegate da leggi note è stata recentemente rispolverata da Arthur Koestler. Nel suo ultimo libro, *Le radici del caso* (Astrolabio-Ubaldini, 1973), egli dedica molte pagine a una teoria sviluppata da Paul Kammerer, un eccentrico biologo austriaco le cui convinzioni lamarckiane furono molto ammirate da T. D. Lysenko e che fu il protagonista del precedente libro di Koestler, *The Case of the Midwife Toad*. Kammerer scrisse un libro, *Das Gesetz der Serie* (La legge della serie), pubblicato a Stoccarda nel 1919, sulla sua teoria delle coincidenze. In esso egli descrisse esattamente 100 coincidenze – concernenti parole, numeri, persone, sogni e così via – da lui raccolte per un periodo di 20 anni.

La settima coincidenza di Kammerer è tipica. Il 18 settembre 1916 sua moglie si trovava nella sala d'aspetto di un medico, dove stava osservando su una rivista riproduzioni di quadri di un certo Schwalbach. Si aprì una porta e l'infermiera chiese se ci fosse la signora Schwalbach. La decima coincidenza di Kammerer è ancor più sorprendente: due soldati furono ricoverati separatamente nello stesso ospedale. Entrambi avevano 19 anni, erano affetti da polmonite, erano nati in Slesia, erano volontari nel Corpo trasporti e si chiamavano Franz Richter.

Kammerer era persuaso che stranezze del genere potessero essere spiegate solo assumendo una legge generale, indipendente dalla causalità fisica, tendente a « riunire il simile col simile ». Koestler dimostra simpatia per questo punto di vista. Egli suggerisce che alcuni risultati della parapsicologia, come la tendenza di un dado a presentare un certo numero più spesso di quanto ci si debba attendere, potrebbero essere spiegati non con l'influenza della mente sulla materia, ma come coincidenze prodotte da una « tendenza integrativa » trascendente.

Stimare la probabilità che una legge nascosta sia all'opera dietro una serie di coincidenze apparenti è un compito difficile e gli statistici hanno sviluppato a tal fine tecniche molto perfezionate. Quanto sia facile alle nostre intuizioni andare fuori strada è illustrato da molti paradossi familiari. Se in una classe si trovano 23 studenti e ne scegliamo due a caso, la probabilità che la loro data di nascita (mese e giorno) coincida è di circa 1/365. La probabilità che almeno due tra i 23 abbiano la stessa data di nascita è nondimeno di poco superiore a 1/2. La ragione è che ora ci sono $1 + 2 + 3 + \ldots + 22 = 253$ possibili coppie candidate a coincidere, e quindi il tentativo di esprimere con un numero l'esatta probabilità di una coincidenza è un po' rischioso.

In una classe di 35 studenti la probabilità della coincidenza di una data di nascita sale a circa l'85 per cento. Se gli studenti dicono uno per uno a voce alta la loro data di nascita finché qualcuno alzi una mano per indicare che la propria data di nascita coincide con quella appena pronunciata, ci si può attendere che ciò avvenga dopo circa nove chiamate.

William Moser ha sottolineato che ancora migliori sono le probabilità che in un gruppo di 14 persone ce ne siano due che abbiano date di nascita identiche o cadenti in due giorni consecutivi dell'anno. Tra sette persone, egli calcola, c'è una probabilità del 60 per cento circa che due abbiano la propria data di nascita entro sette giorni di distanza l'una dall'altra, e tra quattro persone c'è una probabilità del del 70 per cento che due abbiano date di nascita entro 30 giorni di distanza l'una dall'altra.

Le varianti dell'idea base sono infinite. La prossima volta che vi trovate in un gruppo di una dozzina o più persone cercate di accertare cose come la quantità esatta di moneta spicciola che ciascuna persona ha, il nome di battesimo dei genitori di ciascuno, il numero delle relative abitazioni, la carta da gioco che ciascuno scrive in segreto su una strisciolina di carta ecc. Il numero di coincidenze potrebbe essere allarmante.

Un'altra semplice dimostrazione di un evento che potrebbe sembrare improbabile ma che di fatto non lo è può essere fornita con un mazzo di carte da gioco. Si mescolino le carte, poi le si scopra enunciandone i nomi in un ordine predeterminato, per esempio dall'asso al re di picche, e passando poi a cuori, fiori e quadri. La probabilità che si presenti una carta appena nominata è di 1/52, ma la probabilità che almeno una carta venga voltata quando si dice il suo nome è di quasi 2/3. Se si dice soltanto il valore delle singole carte, trascurando i semi, la probabilità di un « centro » sale al 98 per cento, ossia è molto vicina alla certezza.

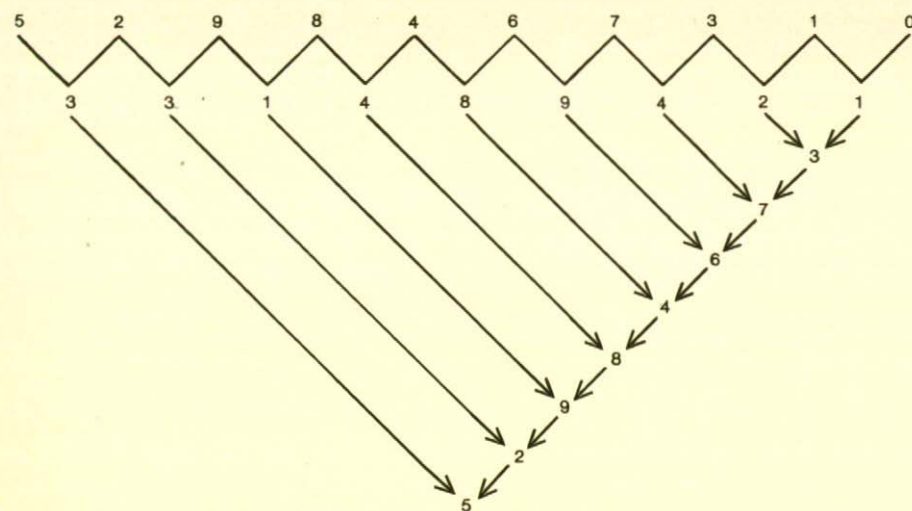
Nei casi nominati in precedenza, le probabilità possono essere calcolate con precisione. Per la maggior parte degli eventi che hanno luogo nella vita di tutti i giorni, invece, le stime della probabilità di coincidenze sono necessariamente vaghe. Per esempio, sono state compiute numerose ricerche sul « problema di quant'è piccolo il mondo ». Se, per esempio, incontrate in aereo uno straniero, qual è la probabilità che abbiate almeno un conoscente in comune? Non soltanto è difficile formulare una statistica precisa, ma è impossibile anche definire con precisione i termini stessi del problema. Chi, per esempio, può essere considerato un « conoscente »?

Benché sussistano difficoltà così gravi, ci sono nondimeno indizi assai significativi a favore della tesi che il mondo è in realtà più piccolo di quanto immagini la maggior parte delle persone. Supponiamo che a un individuo sia dato un documento e gli venga chiesto di trasmetterlo a qualcuno che egli non conosce, e che vive in un'altra città. Il procedimento consiste nell'inviare il documento a un amico che si conosce bene e che si ritiene molto probabile conosca la persona in questione. L'amico, a sua volta, invia il documento a un *suo* amico con le stesse istruzioni, e la catena continua finché il documento raggiunge il destinatario. Quanti anelli intermedi possiederà la catena? La maggior parte delle persone congettura un centinaio circa. Quando lo psicologo Stanley Milgram eseguì test reali, trovò che le catene avevano un numero di anelli varianti da due a 10 e che il numero medio era 5.

Scegliamo due donne a caso: la probabilità che entrambe calzino scarpe verdi è bassa, ma se consideriamo 20 modi in cui le donne possono essere fatte rientrare in una classe comune – colore degli occhi, nome di battesimo, tipo di acconciatura ecc. – la probabilità di una coincidenza si avvicina alla certezza. Per quanto sia difficile crederlo, grossolani errori giudiziari sono stati causati dall'incomprensione di verità così banali. Nel 1964 a San Pedro, in California, un negro e sua moglie, che era una bianca, furono dichiarati colpevoli di un crimine soprattutto per il fatto che erano la sola coppia nella zona che corrispondesse alle descrizioni dei testimoni su cinque punti: la ragazza era bionda, aveva una pettinatura a coda di cavallo, il suo compagno era un negro, aveva la barba, e viaggiavano su un'auto gialla. Il pubblico ministero stimò ciascuna probabilità separatamente – 1/10 per una macchina gialla, 1/1000 che una coppia fosse composta da un negro e da una bianca e così via –, dopo di che moltiplicò le cinque frazioni e convinse la giuria che si aveva una probabilità di 1/12 000 000 che nelle vicinanze vivesse un'altra coppia corrispondente alla descrizione. Soltanto quattro anni dopo la Corte suprema della California ribaltò la decisione dopo che un giudice meno ignorante

Achtung
WARNING
Alerte
!
See Advertisement Page 86
MONARCH PUBLISHING CO.
New York

Achtung
WARNING
Alerte
!
We hope you'll never have to spend a long winter's night in an air-raid shelter, but we were just thinking . . . it's only common sense to be prepared. If you're not too busy between now and Christmas, why not sit down and plan a list of the things you'll want to have on hand. . . . Canned goods, of course, and candles, Sterno, bottled water, sugar, coffee or tea, brandy, and plenty of cigarettes, sweaters and blankets, books or magazines, vitamin capsules . . . and though it's no time, really, to be thinking of what's fashionable, we bet that most of your friends will remember to include those intriguing dice and chips which make Chicago's favorite game
THE DEADLY DOUBLE
$2.50 at leading Sporting Goods and Department Stores Everywhere

I due annunci sul Deadly Double *apparsi sul « New Yorker » il 22 novembre 1941.*

La risposta di Benson P. Ho.

in matematica l'aveva persuasa che la stima avrebbe dovuto essere di circa 41/100.

Chiunque rifletta su coincidenze che possono interessarlo ne troverà facilmente. « Hai mai osservato questa notevole coincidenza? – scriveva nel 1928 F. Scott Fitzgerald all'autore britannico Shane Leslie. – Bernard Shaw ha 61 anni, H. G. Wells 51, G. K. Chesterton 41, lei 31, e io 21. Tutti i grandi scrittori del mondo in progressione aritmetica". Nel « New York Times » del 6 gennaio 1967 comparve la notizia che Carl Sandburg, avendo compiuto il suo 89° compleanno attendeva fiduciosamente di vivere fino a 99 anni. Egli aveva avuto due bisavoli e un nonno che erano morti in età corrispondenti a multipli di 11 anni. Avendo superato sano gli 88 anni, Sandsburg si attendeva di arrivare a 99. Purtroppo morí sei mesi dopo.

La coincidenza sicuramente piú strana che coinvolse un grande settimanale americano fu il caso delle inserzioni del « *Deadly Double* » (doppio mortale) nel « New Yorker » del 22 novembre 1941 che fecero correre voci, per molti anni, su agenti segreti giapponesi. Le voci, a lungo sotterranee, emersero nel 1967 quando un ex agente del servizio informazioni della marina americana, Ladislav Farago, raccontò l'episodio in un'anticipazione sulla stampa di parti del suo libro *The Broken Seal*, un'esposizione delle operazioni dei servizi segreti americano e giapponese prima della Seconda Guerra Mondiale. Sedici giorni prima di Pearl Harbor, il « New Yorker » pubblicò (alle pagg. 32 e 86) due inserzioni pubblicitarie concernenti un nuovo gioco di dadi chiamato il *Deadly Double* (*si veda la figura alla pagina precedente*). Queste inserzioni erano forse state messe dai giapponesi per informare i loro agenti segreti del progettato attacco di Pearl Harbor?

Il testo concesso da Farago alla stampa sottolineò le seguenti correlazioni. L'attacco ebbe luogo il 7 dicembre. Nella prima finestrella pubblicitaria (quella piú piccola) si osserva il numero 12 (per indicare il mese di dicembre) su un dado e il numero 7 sull'altro. Al di sopra dei dadi sono le parole « Achtung Warning Alerte! » I numeri 5 e 0, disse Farago, avrebbero potuto indicare l'ora progettata per l'attacco, che di fatto non ebbe inizio fino alle 7,00 del mattino. XX, ossia 20, è la latitudine approssimativa di Pearl Harbor. Farago ammise di non sapere quale fosse il significato del numero 24.

La seconda inserzione presenta due persone che giocano a dadi durante un'incursione aerea, con le due X ripetute sul simbolo tedesco dell'aquila bicipite. Un articolo pubblicato dal « Times » il 12 marzo 1967 e fondato sulle anticipazioni date da Farago alla stampa, affermò che il misterioso gioco dei dadi non era mai esistito. Farago raccontò al « Times » di esser venuto a conoscenza delle due inserzioni dal suo amico Al Hirschfeld, il caricaturista. Quando Farago pose domande in proposito a funzionari del « New Yorker », « essi si dimostrarono molto reticenti ».

Queste asserzioni fantastiche furono rapidamente dissipate dal seguito dell'articolo, pubblicato dal « Times » due giorni dopo, e cioè il 14 marzo. Il gioco di dadi *esisteva*. La signora E. Shaw Cole, vedova dell'uomo che lo aveva inventato, era stata rintracciata a Montclair, nel New Jersey. Essa stessa aveva aiutato il suo defunto marito, Roger Paul Craig, a scrivere le inserzioni. Vari grandi magazzini di New York vendettero il gioco nel 1941. Agenti del FBI, disse la signora Cole, le avevano fatto visita dopo l'attacco a Pearl Harbor, ma ogni relazione tra l'attacco e le inserzioni era risultato di « una grande coincidenza ».

Vari anni fa chiesi al dottor Matrix, il famoso numerologo, quale fosse la sua opinione sull'inserzione. Le XX, egli mi disse, indicano che le due X devono essere riferite all'alfabeto. Il primo numero sul dado, il 12, ci dice che dobbiamo contare fino alla dodicesima lettera, la *L* (si tratta ovviamente dell'alfabeto americano). Il secondo numero, il 24, ci dice di contare 24 lettere in avanti a partire dalla *L*, includendovi ovviamente la *X* e ricominciando il conto dal principio. Questo secondo conteggio dà come risultato la *H*. Il 7 sul dado di destra ci dice di contare sette lettere dopo la *H*; arriviamo cosí alla *O*. Le tre lettere trovate in questo modo lineare sono dunque, come abbiamo visto, *L*, *H* e *O*, le iniziali di Lee Harvey Oswald. Le inserzioni apparvero sul « New Yorker » il 22 novembre del 1941. Il 22 novembre fu la data dell'assassinio del presidente John F. Kennedy, e 22 aggiunto a 1941 dà appunto 1963, l'anno dell'assassinio.

È facile capire come chiunque sia personalmente coinvolto in una coincidenza notevole sia incline a credere all'opera di forze occulte. Non possiamo biasimare il vincitore della Lotteria di Capodanno se pensa che la Fortuna gli ha sorriso, anche se egli è assolutamente certo del fatto che qualcuno doveva pur vincere. I giocatori d'azzardo sono particolarmente inclini ad avere convinzioni di questo genere, e tendono a essere piú superstiziosi della maggior parte della gente. In tutte le grandi città degli Stati Uniti ci sono migliaia di persone che giocano al policy (una sorta di lotto) i numeri piú significativi che emergono nella cronaca. Nel 1958, per esempio, 48 persone morirono a New York quando un treno della Jersey Central precipitò nella Newark Bay. L'ultima carrozza estratta dall'acqua fu presentata sui giornali e alla televisione col numero chiaramente visibile. Migliaia di giocatori di Manhattan giocarono il 932 e vinsero. Una coincidenza simile fu riferita nel « New York Times » del 24 gennaio 1967. La figlia del presidente Johnson, Lucy, aveva appena dato alla luce un bambino che pesava 8 libbre e 10 once. In tutta Brooklyn furono fatte giocate permutando in vario modo queste tre cifre. Quando lo 081 vinse, i banchi del *policy* di Brooklyn dovettero chiudere per vari giorni.

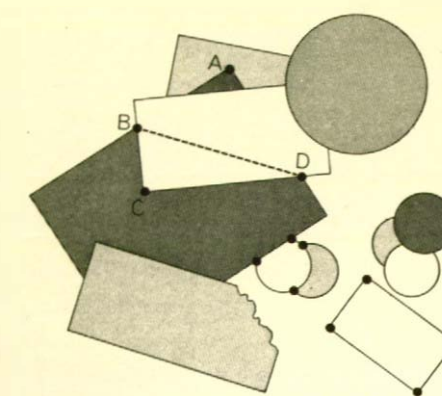
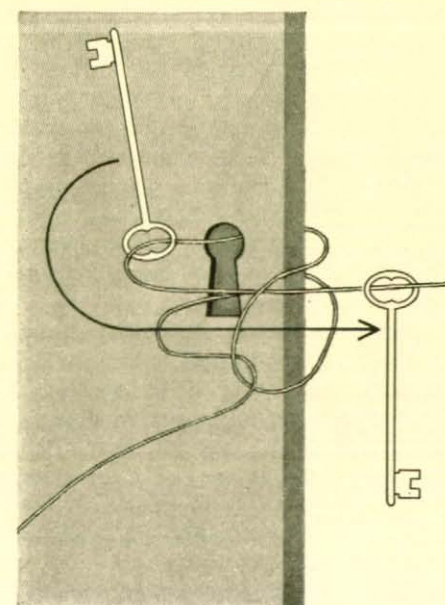
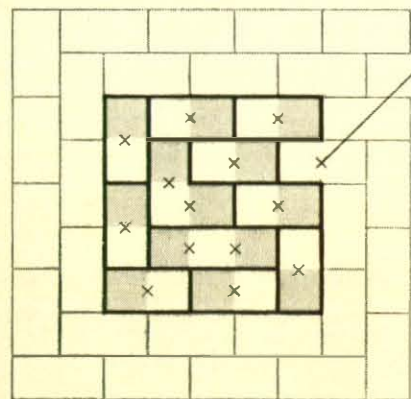
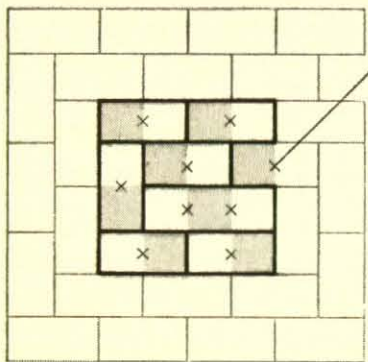
Nella scienza, come nella vita quotidiana, non è sempre facile stabilire se una correlazione osservata di « simile a simile » sia una pura coincidenza o una dimostrazione dell'esistenza di una struttura sottostante. Fu una coincidenza (piú qualche aggiustamento piú o meno forzato) il fatto che le orbite planetarie si adattassero al modello kepleriano dei solidi platonici inscatolati l'uno nell'altro, mentre non fu una coincidenza che i dati delle orbite si adattassero ai suoi modelli di ellissi. È indubbiamente una coincidenza il fatto che i dischi del Sole e della Luna, visti dalla Terra, abbiano quasi esattamente la stessa grandezza. Il diametro del Sole è 400 volte maggiore di quello della Luna, ma il Sole si trova incredibilmente a una distanza 400 volte maggiore, come se la natura avesse progettato la cosa in modo tale da darci una visione spettacolosa della corona solare nel corso di una eclisse totale. D'altra parte, per mezzo secolo la maggior parte dei geologi rimasero convinti del fatto che la concordanza dei margini delle masse continentali ai due lati dell'Atlantico fosse una mera coincidenza. La teoria di Alfred L. Wegener, secondo cui le due masse continentali avevano costituito un tempo, congiuntamente, un supercontinente che si era spezzato e le cui parti si erano allontanate per un movimento di deriva (una nozione che era stata suggerita da Francesco Bacone) fu considerata eccentrica fino a una decina di anni fa.

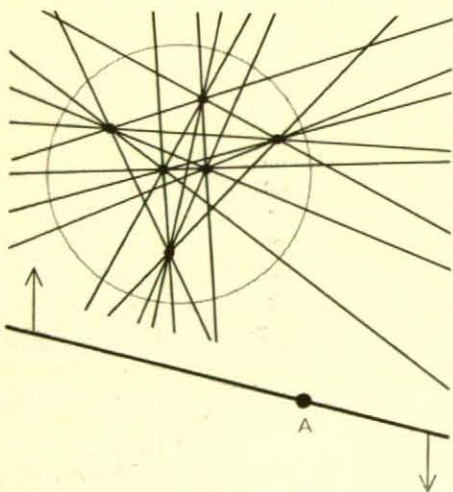
In matematica si incontrano difficoltà simili. La curiosa ripetizione del 1828 nei primi nove decimali di *e* (2,718281828...) è quasi certamente una semplice coincidenza. Consideriamo ora la radice quadrata di 0,999 e di 0,9999999. Esse sono, rispettivamente, 0,9994... e 0,99999994... È accidentale il fatto che in ogni caso la radice quadrata irrazionale di una frazione decimale composta da *n* 9 cominci con *n* 9 seguiti da un 4? No: si può dimostrare che esso vale per tutte le frazioni decimali analoghe costituite da una ripetizione del 9. Per stabilire il teorema non c'è che da esprimerne le radici quadrate come $(1-10^{-n})^{1/2}$, sviluppare l'espressione mediante il teorema del binomio e interpretarne opportunamente i risultati.

Il numero 4 è un numero quadrato, e se uniamo a esso il quadrato successivo, il 9, otteniamo il 49, un altro quadrato. Si tratta di una coincidenza o di un caso speciale di una legge generale? Un altro problema curioso (a entrambi risponderemo il prossimo mese): un anziano appassionato di rompicapo chiede qual è il principio ordinatore che si cela dietro la sequenza 5298467310, la quale contiene tutte le 10 cifre. La risposta è che i numeri sono disposti secondo l'ordine alfabetico dei loro nomi.

Quando la « Technology Review »

Soluzione al problema della chiave.

La soluzione al cubo rotolante.

I tre insiemi di punti cocircolari.

Soluzione al problema degli stuzzicadenti.

dell'Istituto di Tecnologia del Massachusetts stampò questa risposta nel numero del luglio 1967, aggiunse una seconda risposta, che era stata fornita da un lettore di nome Benson P. Ho. La soluzione è spiegata nel modo migliore dal suo diagramma (*si veda la figura a pag. 102 in alto*). La cifra che si trova sull'asta di destra di ciascuna V viene sottratta dalla cifra che si trova sopra l'asta sinistra. Se il risultato è negativo si aggiunge 10. Il risultato viene segnato inferiormente a ciascuna V. Le frecce indicano cifre che sono la somma delle due cifre che si trovano dietro le coppie di frecce. Se la somma è maggiore di 10 si sottrae 10. Si osservi che la serie diagonale di cifre, letta verso l'alto, ripete la serie originale. Si tratta di una coincidenza notevole, oppure...?

Dimostrazione del problema del milione di punti.

Ecco le risposte ai brevi problemi proposti il mese scorso.

1

La strategia di fuga della ragazza è innanzitutto quella di remare in modo che il centro del lago, segnato dalla zattera, sia sempre tra lei e l'uomo sulla riva, in modo tale che i tre punti siano sulla stessa retta. L'uomo corre quattro volte più velocemente di quanto la ragazza possa remare, per cui la ragazza può seguire questa strategia e allo stesso tempo muoversi verso la riva fino a raggiungere una distanza dal centro che sia un quarto del raggio del lago. È questo il punto di stallo in cui la velocità angolare che la ragazza è in grado di mantenere è proprio uguale a quella dell'uomo. Appena raggiunto questo punto la ragazza può muoversi in linea retta verso il bordo del lago. Essa deve percorrere una distanza di $3r/4$ (r è il raggio del lago) mentre l'uomo deve percorrere una distanza di πr sul terreno, che equivale però a una distanza effettiva di $\pi r/4$ dato che la velocità dell'uomo è quadrupla di quella della ragazza. Dato che π è maggiore di 3, la ragazza è in grado di salvarsi.

2

Per far passare la chiave da una parte all'altra della porta occorre dapprima far passare la chiave nel cappio in modo che si trovi nella posizione indicata a sinistra nella figura in basso a pagina 102. Si prenda la corda nei punti A e B e si tiri il cappio indietro e attraverso il buco della serratura; ciò provocherà la formazione di due altri cappi al di qua del buco come mostra l'illustrazione al centro. Si muova ora la chiave verso l'alto facendola passare attraverso entrambi i cappi. Si afferrino le due corde dall'altra parte della porta e si facciano passare i due cappi attraverso il buco della chiave, riportando così la corda nella posizione iniziale (*illustrazione a destra a pagina 102*). Si faccia ora scivolare la chiave verso destra e il gioco è fatto.

3

Il minimo numero di segmenti unitari che si devono eliminare per distruggere i quadrati da una scacchiera quattro per quattro è nove. Un modo per dimostrarlo è illustrato nel quadrato interno del disegno superiore della figura in alto in questa pagina.

Per dimostrare che si tratta del minimo si noti che le otto celle ombreggiate non hanno lati in comune; per spezzare tutti i perimetri di tutte le otto celle occorre eliminare almeno otto segmenti. La stessa argomentazione vale per le otto celle bianche. Possiamo però « uccidere » tutte le 16 celle eliminando solo otto segmenti, eliminando cioè i segmenti che distruggono contemporaneamente una cella bianca e una cella ombreggiata. Ma così facendo non si interrompe nessuna delle linee esterne della scacchiera che formano il quadrato più grande. Perciò occorre eliminare almeno un altro segmento per spezzare il quadrato esterno. Come mostra la figura, le stesse nove linee distruggono tutti e 30 i quadrati della scacchiera.

Un'argomentazione analoga mostra che ogni quadrato di ordine n pari ha una soluzione almeno pari a $n^2/2 + 1$. È possibile fare questo per tutti i quadrati di ordine pari? Una dimostrazione per induzione è implicita nel procedimento mostrato nell'illustrazione. Basta inserire una pedina di domino nella cella aperta sul bordo del quadrato quattro per quattro, e poi proseguire la catena di domino attorno al bordo, come è mostrato nella figura. Questa tecnica fornisce una soluzione minima di 19 per una scacchiera sei per sei e di 33 per una scacchiera otto per otto. È ovvio che questa procedura può essere ripetuta indefinitamente partendo sempre dal quadrato libero che rimane sul bordo della scacchiera, come indica la freccia.

Sulla scacchiera cinque per cinque la situazione è complicata dal fatto che vi è una casella ombreggiata in più. Occorre eliminare almeno 12 linee per eliminare contemporaneamente 12 caselle bianche e 12 caselle ombreggiate; in questo modo si formano così 12 pedine da domino. Se la casella ombreggiata è sul bordo esterno basta una linea per eliminarla assieme al quadrato più grande. Ciò fa pensare che i quadrati di ordine dispari abbiano una soluzione minima pari a $(n^2 + 1)/2$. Per ottenerla, però, i domino risultano disposti in modo tale da non spezzare nessun quadrato di ordine maggiore di uno. Dato che questo non è possibile, la soluzione minima è $(n^2 + 1)/2 + 1$. La parte inferiore della figura in alto in questa pagina dimostra questo risultato per tutti i quadrati di ordine dispari.

4

È facile dimostrare che per ogni insieme infinito di punti nel piano vi è un'infinità di rette che dividono l'insieme stesso esattamente a metà. La seguente dimostrazione nel caso di sei punti, illustrata nella figura in basso nella pagina a fronte si applica al caso di qualsiasi numero finito di punti.

Consideriamo ogni linea individuata da qualsiasi coppia di punti. Si prenda un altro punto, A, che sia all'esterno della curva chiusa che racchiude gli altri punti e che *non* giaccia su nessuna delle linee considerate. Si tracci una linea passante per il punto A. Quando questa linea ruota attorno al punto A, nella direzione indicata dalla figura, passa per ciascuno dei sei punti, uno alla volta. (Non può passare contemporaneamente per due punti, dato che ciò significherebbe che A si trova sulla retta individuata dagli stessi due punti.) Dopo che la retta in rotazione è passata per metà dei punti racchiusi dalla curva, divide l'insieme di punti esattamente in due. Poiché A può essere scelto in una posizione qualsiasi, vi è un'infinità di rette che dividono l'insieme in due parti.

5

Le prime due condizioni possono essere soddisfatte solo da due disposizioni di Re (K) e Donne (Q): KQQ e QKQ. Le ultime due condizioni possono essere soddisfatte solo con due disposizioni di cuori (C) e di picche (P): PPC e PCP. I due insiemi di soluzioni si combinano in quattro modi possibili:

KP, QP, QC
KP, QC, QP
QP, KP, QC
QP, KC, QP

L'ultima soluzione viene eliminata perché contiene due Donne di picche. Poiché ciascuna delle altre tre soluzioni contiene un Re di picche, una Donna di picche e una Donna di cuori, possiamo essere certi che si tratta delle tre carte che si trovano sulla tavola. Non siamo in grado di conoscere la posizione di ciascuna delle carte, ma siamo certi di poter dire che la prima è una carta di picche e che la terza è una Donna.

6

I tre insiemi di punti circolari sui rettangoli e i cerchi gettati a caso sul tavolo sono indicati dai punti neri più marcati nella figura in basso a pagina 103. I quattro vertici del rettangolo sono già stati menzionati il mese scorso. I quattro punti sul cerchio piccolo sono ovviamente cocircolari. Il terzo insieme è costituito dai punti A, B, C, D. Per dimostrarlo si tracci la linea punteggiata BD e la si consideri come il diametro del cerchio richiesto. Poiché gli angoli in A e C sono angoli retti, sappiamo (da un elementare teorema di geometria piana) che A e C giacciono proprio su una circonferenza di cui BD è il diametro.

7

Il procedimento più efficace per esaminare un numero qualsiasi di bicchieri contenenti liquido al fine di determinare quale di essi contiene veleno è la procedura binaria. I bicchieri vanno divisi a metà (o almeno all'incirca) e si esamina una delle metà (mescolando i campioni di liquido prelevato da tutti i bicchieri di tale metà ed esaminandone un campione). L'insieme di bicchieri nei quali è stato rilevato il veleno viene nuovamente diviso a metà, e la procedura viene ripetuta fino a che non viene identificato il bicchiere contenente il veleno. Se il numero dei bicchieri va da 100 a 128 incluso, sono necessari sette esami. Da 129 a 200 bicchieri sono necessari otto esami. Il numero 128 è il numero cruciale dato che è l'unico numero tra 100 e 200 che appartiene alla serie delle potenze di 2: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256,... Nella cucina dell'albergo vi dovevano essere 129 bicchieri, poiché solo in questo caso (avevamo detto che il numero dei bicchieri era compreso tra 100 e 200) il primo esame di un bicchiere qualsiasi non avrebbe influito sull'applicazione del più efficace metodo di analisi. Esaminare 129 bicchieri, con la procedura del dimezzamento, richiede otto esami. Ma se per primo si esamina un bicchiere qualsiasi, i rimanenti 128 richiedono soltanto sette analisi, per cui il numero totale di analisi rimane lo stesso.

8

Le soluzioni al problema del « cubo rotolante » sono illustrate nella figura in alto a pagina 103. Nella prima soluzione la faccia rossa del cubo è diretta verso l'alto solo nelle due caselle agli angoli superiori della scacchiera. Nella seconda soluzione il punto segna la casella di inizio del « giro », con la faccia rossa del cubo diretta verso l'alto.

MATEMATICA

LE SCIENZE
edizione italiana di
SCIENTIFIC AMERICAN

ha finora pubblicato:

LA TEORIA NON CANTORIANA DEGLI INSIEMI
di P.J. Cohen e R. Hersh (n. 1)

C'È UN LIMITE ALLE PRESTAZIONI DEI CALCOLATORI?
di S. Winograd (n. 4)

LE CODE
di M.A. Leibowitz (n. 5)

MOTO BROWNIANO E TEORIA DEL POTENZIALE
di R. Hersh e R.J. Griego (n. 10)

VERITÀ E DIMOSTRAZIONE
di A. Tarski (n. 12)

LA SIMMETRIA E LA SCIENZA
di Beniamino Segré (n. 14)

LA GEOMETRIA NON-EUCLIDEA PRIMA DI EUCLIDE
di Imre Tóth (n. 17)

LE APPLICAZIONI DEL CALCOLO BARICENTRICO
di Emma Castelnuovo (n. 18)

LA PARTICOLARE DISTRIBUZIONE DELLE PRIME CIFRE
di R.A. Raimi (n. 20)

UN NUOVO LIVELLO DI ASTRAZIONE: LA TEORIA DELLE CATEGORIE
di L. Lombardo-Radice (n. 21)

PROBLEMI NON RISOLTI DELL'ARITMETICA
di Howard DeLong (n. 34)

TRE PERSONAGGI DELLA MATEMATICA
di Bruno de Finetti (n. 39)

I MODELLI MATEMATICI E L'AMBIENTE NATURALE
di Renato Pennacchi (n. 45)

UN LIBRO DI LOGICA SMARRITO DI LEWIS CARROLL
di W.W. Bartley III (n. 50)